

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Maja Plavšić

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Pero Prebeg, dipl. ing.

Studentica:

Maja Plavšić

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, služeći se navedenom literaturom i uz stručnu pomoć Doc. dr. sc. Pere Prebega.

Zahvaljujem se mentoru, Doc. dr. sc. Peri Prebegu na posvećenom vremenu, strpljenju, pruženoj pomoći i stručnom vodstvu tijekom izrade ovog rada.

Hvala Doc.dr.sc. Jerolimu Andriću na uloženom trudu, korisnim primjedbama, sugestijama i savjetima tokom izrade diplomskog rada.

Posebno se zahvaljujem sestri i roditeljima na pruženoj podršci tijekom studiranja.

Maja Plavšić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
 Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
 Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija brodogradnje



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Maja Plavšić** Mat. br.: 0035171885

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **PROJEKTIRANJE STRUKTURE GLAVNOG REBRA TANKERA PREMA HARMONIZIRANIM PROPISIMA (IACS CSR BC&OT)**
 Naslov rada na engleskom jeziku: **STRUCTURAL DESIGN OF MIDSHIP SECTION OF OIL TANKER ACCORDING TO HARMONIZED RULES (IACS CSR BC&OT)**

Opis zadatka:

Potrebno je projektirati uzdužne dimenzije glavnog rebra tankera za prijevoz nafte prema novim Harmoniziranim zajedničkim pravilima za projektiranje konstrukcije brodova za prijevoz rasutog tereta i tankera za prijevoz nafte Međunarodnog udruženja klasifikacijskih društava (IACS CSR BC & OT). U okviru rada potrebno je provesti strukturnu optimizaciju glavnog rebra s ciljem minimizacije mase i maksimizacije uzdužne granične čvrstoće trupa tankera u neoštećenom i oštećenom stanju.

Zadatak obuhvaća sljedeće:

- upoznavanje s novim Harmoniziranim pravilima s naglaskom na lokalno dimenzioniranje strukturnih elemenata i uzdužnu graničnu čvrstoću trupa broda u neoštećenom i oštećenom stanju,
- izradu strukturnog modela glavnog rebra trupa tankera te dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata primjenom programa Mars 2000,
- izradu strukturnog modela glavnog rebra trupa tankera programom MAESTRO, prikladnog za proračun uzdužne granične čvrstoće trupa broda, a koristeći na FSB-u razvijen programski modul (LUSA),
- usporedbu rezultata ostvarenih programom Mars 2000 i LUSA na razini graničnog momenta savijanja za prototipnu konstrukciju,
- pripremu optimizacijskog modela u programu Demak, pri čemu je donje granice projektnih varijabli potrebno zadati prema proračunu minimalnih lokalnih dimenzija prema Harmoniziranim pravilima,
- provođenje optimizacije te analizu rezultata i usporedbu relevantnih varijanti konstrukcije tankera pri čemu je potrebno obrazložiti koji kriteriji najznačajnije utječu na dimenzije relevantnih varijanti.

U radu treba navesti korištenu literaturu te eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

7. svibnja 2015.

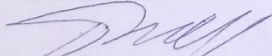
Rok predaje rada:

9. srpnja 2015.

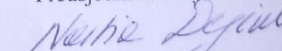
Predviđeni datumi obrane:

15., 16. i 17. srpnja 2015.

Zadatak zadao:


 Doc. dr. sc. Pero Prebeg

Predsjednica Povjerenstva:


 Prof. dr. sc. Nastia Degiuli

Sadržaj:

Popis slika:	III
Popis tablica:	V
Popis oznaka:.....	VI
Sažetak	VIII
Summary	IX
1. Uvod.....	1
2. Zahtjevi za proračun uzdužne granične čvrstoće trupa broda prema pravilima IACS H-CSR[1].....	2
2.1. Proračun uzdužne čvrstoće broda u oštećenom stanju	4
2.2. Parametar podobnosti	6
3. Inkrementalno – iterativna metoda analize progresivnog kolapsa[2]	7
3.1. Teorijske osnove	7
3.2. Diskretizirani model	12
3.3. Krivulje naprezanje-deformacija $\sigma - \epsilon$	12
3.4. Granični moment savijanja i kolapsna sekvenca.....	13
4. Osnove optimizacijskog problema i optimizacijske metode [5]	15
4.1. Definicija projektnog problema	16
4.2. Projektni prostor	18
4.3. Atributni prostor	18
4.4. Definicija koncepta nedominiranosti	19
4.5. Optimizacija rojem čestica	19
4.5.1. Osnovni algoritam optimizacija rojem čestica (<i>Particle swarm optimization- PSO</i>)	20
4.5.2. Prilagodba optimizacije rojem čestica za rad s višeciljnim problemima	23
4.5.3. Prilagodba algoritma za rad s ograničenjima	27
4.6. Mjerenje kvalitete Pareto fronte	29

4.7. Indikatori kvalitete ostvarene Pareto fronte	31
5. Projektiranje glavnog rebra tankera	35
5.1. MARS model.....	35
5.1.1. Rezultati proračuna u programu MARS.....	38
5.2. LUSA model	39
5.3. Usporedba rezultata – MARS2000 i LUSA	41
5.4. Optimizacija glavnog rebra tankera	42
5.4.1. Definicija optimizacijskog problema	43
5.4.2. Varijable	45
5.4.3. Ograničenja	55
5.4.4. Atributi	56
5.4.5. Optimizacijski algoritam	56
5.4.6. Rješenja optimizacijskog problema	58
5.5. Usporedba rezultata odabranog projekta i prototipa	71
6. Zaključak	75
Literatura:	77

Popis slika:

Slika 1.	Krivulja ovisnosti momenta savijanja o zakrivljenosti trupa [1]	4
Slika 2.	Opseg oštećenja kod sudara[1].....	4
Slika 3.	Opseg oštećenja kod nasukavanja[1]	5
Slika 4.	Algoritam numeričkog rješavanja proračuna graničnog momenta savijanja [3].....	9
Slika 5.	Savijanje Euler-Bernoullijeve grede [2].....	11
Slika 6.	Osnovna formulacija potpore procesu odlučivanja [7].	17
Slika 7.	Dijagram toka osnovnog PSO algoritma.....	22
Slika 8.	Osnovni princip Sigma metode [9]	27
Slika 9.	Kvaliteta Pareto fronte	30
Slika 10.	Grafički prikaz odnosa dominiranosti kod minimuma za rješenja i skupove rješenja.....	33
Slika 11.	Pregled debljina oplata	36
Slika 12.	Pregled vrsta materijala	36
Slika 13.	Pregled uzdužnjaka	37
Slika 14.	MAESTRO model glavnog rebra.....	40
Slika 15.	MAESTRO model glavnog rebra s oštećenjem boka	40
Slika 16.	MAESTRO model glavnog rebra s oštećenjem dna	41
Slika 17.	Optimizacijska kontrolna ploča.....	44
Slika 18.	Pregled karakteristika optimizacijskog problema	45
Slika 19.	Primjer definirane varijable-debljina oploćenja	46
Slika 20.	Primjer definirane varijable-ekvivalentni T-profil	46
Slika 21.	Primjer definiranih dovođenih profila unutar odabrane varijable ekvivalentnog T-profila.....	46
Slika 22.	Položaji zadanih karakteristika debljina oploćenja na modelu	47
Slika 23.	Položaji zadanih karakteristika profila na modelu	47
Slika 24.	Definirana ograničenja vezana uz parametar podobnosti	55
Slika 25.	Definirani atributi	56
Slika 26.	Slijed optimizacije.....	57
Slika 27.	Korišteni kontrolni parametri višeciljne optimizacije rojem čestica.....	57
Slika 28.	Prikaz Pareto fronte u ovisnosti o težini, momentu savijanja u progibu, te parametru podobnosti momenta savijanja za progib	59

Slika 29.	Promatrani projekti na Pareto fronti.....	59
Slika 30.	Prikaz nedominirani projekti u ovisnosti o ciljevima.....	60
Slika 31.	Prikaz promatranih nedominirani projekti u ovisnosti o ciljevima.....	60
Slika 32.	Prikaz Pareto fronte preko varijable deck_P3 i ciljeva	61
Slika 33.	Prikaz promatranih projekata Pareto fronte preko varijable deck_P3 i ciljeva.....	62
Slika 34.	2D prikaz Pareto fronte u ovisnosti o varijabli deck_P3 i cilju maksimizacije podobnosti momenta savijanja za progib	62
Slika 35.	2D prikaz Pareto fronte u ovisnosti o varijabli deck_P3 i cilju minimzacije mase.....	63
Slika 36.	Prikaz Pareto fronte preko varijable bottom_P1 i ciljeva	63
Slika 37.	Prikaz promatranih projekata Pareto fronte preko varijable bottom_P1 i ciljeva.....	64
Slika 38.	2D prikaz Pareto fronte u ovisnosti o varijabli bottom_P1 i cilju maksimizacije podobnosti momenta savijanja za progib	64
Slika 39.	2D prikaz Pareto fronte u ovisnosti o varijabli bottom_P1 i cilju minimzacije mase.....	65
Slika 40.	Pareto fronta prikazana preko graničnih momenta savijanja za slučaj progiba za neoštećenu konstrukciju, te za oštećenje uslijed sudara i ulijed nasukavanja	65
Slika 41.	Pareto fronta prikazana preko graničnih momenta savijanja za slučaj progiba za neoštećenu konstrukciju, te za oštećenje uslijed sudara i ulijed nasukavanja	66
Slika 42.	Pareto fronta prikazana preko parametara podobnosti momenta savijanja za slučaj progiba za neoštećenu konstrukciju, te za oštećenje uslijed sudara i ulijed nasukavanja.....	66
Slika 43.	Pareto fronta prikazana preko parametara podobnosti momenta savijanja za slučaj pregiba za neoštećenu konstrukciju, te za oštećenje uslijed sudara i ulijed nasukavanja.....	67
Slika 44.	Pareto fronta prikazana preko parametara podobnosti momenta savijanja za slučaj pregiba i za slučaj progiba neoštećenog modela, te cilja minimizacije mase	67
Slika 45.	Kolapsna sekvenca prototpa i odabranog projekta sa Pareto fronte.....	74

Popis tablica:

Tablica 1.	Opseg oštećenja kod sudara[1].....	4
Tablica 2.	Opseg oštećenja kod nasukavanja[1]	5
Tablica 3.	Načini gubitka nosivosti pojedinih diskretnih sastavnih elemenata.....	13
Tablica 4.	Odnos dominacije rješenja i skupa rješenja	32
Tablica 5.	Granični i zahtjevani momenti savijanja trupa broda proračunati u programu MARS.....	37
Tablica 6.	Rezultati proračuna minimalnih dimenzija oploćenja.....	38
Tablica 7.	Rezultati proračuna minimalnih dimenzija profila.....	39
Tablica 8.	Usporedba momenata savijanja izračunatih pomoću programa MARS i modula LUSA....	41
Tablica 9.	Odabir modela sa oštećenim bokom za daljnju analizu	42
Tablica 10.	Pregled zadanih karakteristika za debljine oploćenja.....	48
Tablica 11.	Pregled zadanih karakteristika za bulb profile	49
Tablica 12.	Usporedba momenata savijanja za odabrane projekte nakon optimizacije..	69
Tablica 13.	Usporedba vrijednosti proračunatih za prototip i projekt 305.....	71
Tablica 14.	Usporedba debljina oploćenja prototipa i odabranog projekta.....	72
Tablica 15.	Usporedba profila prototipa i odabranog projekta	73

Popis oznaka:

Oznaka	Jedinica	Opis
M_U	Nm	uzdužni granični moment savijanja
A	m ²	površina
L	m	duljina broda
B	m	širina broda
D	m	visina broda
E	N/m ²	Youngov modul elastičnosti
I	m ⁴	moment inercije poprečnog presjeka
M_y	Nm	moment savijanja oko osi y
N	N	unutrašnja uzdužna sila
R	m	radijus zakrivljenosti progibne linije grede pri čistom savijanju
w_o	m	poprečni pomak
κ	1/m	fizikalna zakrivljenost progibne linije Euler-Bernoullijeve grede
σ_{yd}	N/m ²	donja granica popuštanja izotropnog materijala
σ_u	N/m ²	kritično naprezanje
χ		kut zakreta poprečnog presjeka grede s obzirom na os z
γ		faktor sigurnosti
z	m	vertikalna udaljenost od osnovice
M_{sw-U}	Nm	granični moment čvrstoće na mirnoj vodi
M_{ww}	Nm	granični moment čvrstoće na valovima
M_{sw-U-h}	Nm	granični moment čvrstoće na mirnoj vodi kod pregiba
M_{sw-U-s}	Nm	granični moment čvrstoće na mirnoj vodi kod progiba
f		faktor distribucije
C		valni koeficijent
C_B		koeficijent istisnine
M_{ww-h}	Nm	granični moment čvrstoće na valovima za pregib
M_{ww-s}	Nm	granični moment čvrstoće na valovima za progib
M_D	Nm	moment čvrstoće kod oštećenog trupa
M_{UD}	Nm	granični moment čvrstoće kod oštećenog trupa
h	m	visina oštećenja na boku
b	m	širina oštećenja dna
g		parametar podobnosti
C_{NA}		koeficijent neutralne osi

Oznaka	Jedinica	Opis
x		projektne varijable
f		funkcija cilja
h		ograničenja jednakosti
g		ograničenja nejednakosti
d		deskriptori, projektni parametri
X		projektni prostor
Y		atributni prostor
y		projektni atributi
k		trenutna iteracija
$^i p$		najbolja lokacija pronađena od strane razmatrane čestice
$^g p$		najbolja (globalna) lokacija pronađena od strane roja
w		inercijski parametar
c_1		kontrolni parametar komponente vlastite brzine
c_2		kontrolni parametar komponente globalne brzine
NP		broj čestica unutar hiperkocke
f_i		iznos dobrote
cf		iznos dobrote ograničenja
cv_j		narušenost ograničenja
$\max cv_j$		maksimalna narušenost j-tog ograničenja s obzirom na narušenost ograničenja od svih lokacija
$pfSpan$		indikator kvalitete raširenost Pareto fronte
n		broj atributa
max_i		najveća pronađena vrijednosti atributa
min_i		najmanja pronađena vrijednosti atributa
Δ		definicijski modul

Sažetak

Ovaj diplomski rad obuhvaća upoznavanje s novim Harmoniziranim pravilima, sa naglaskom na lokalno dimenzioniranje strukturnih elemenata, te na uzdužnu graničnu čvrstoću trupa kako u neoštećenom, tako i kod određenih oštećenja koja mogu biti posljedica sudara, odnosno oštećenja boka, ili nasukavanja, odnosno oštećenja dna. Na temelju Pravila izrađeni su stukturni modeli glavnog rebra trupa tankera.

Izrađen je model primjenom programa MARS 2000 prema kojemu su dimenzionirani konstrukcijski elementi. Iz dimenzija određenih pomoću programa MARS 2000 izrađeni su strukturni modeli u programu MAESTRO glavnog rebra trupa tankera za neoštećeno stanje, za slučaj oštećenog boka, te za slučaj oštećenog dna. Ti modeli prikladni su za proračun uzdužne granične čvrstoće trupa broda koristeći programski modul razvijen na FSB-u (LUSA). Rezultati dobiveni programskim modulom LUSA uspoređuju se sa rezultatima ostvarenima programom MARS 2000.

Na temelju izrađenih modela, izrađen je optimizacijski model u programu DeMak. U ovom radu donje granice projektnih varijabli zadane su prema proračunu minimalnih lokalnih dimenzija prema Harmoniziranim pravilima. Ciljevi optimizacije bili su što manja masa uz što veći postignuti granični moment savijanja. Za provedenu optimizaciju izvršena je analiza rezultata, te usporedba početnog, prototipnog modela i modela odabranog nakon optimizacije.

Ključne riječi:

granična čvrstoća, višekriterijsko projektiranje, optimizacija

Summary

This thesis covers familiarization with the new Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers, with a focus on local scantling of structural elements and the longitudinal ultimate strength of the hull in intact as well as in damage condition which can be result of the collision, or grounding. Structural midship section of oil tanker models were build based on the Rules .

Models were built by using the MARS 2000 program, according to which, structural elements were designed. According to the scantling from the MARS 2000 program a structural midship hull tanker models were built by using the program MAESTRO for intact condition, for collision condition and for grounding condition. These models are suitable for calculating the longitudinal ultimate hull strength using a computer program developed at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture (LUSA- longitudinal ultimate strength analysis). Results obtained by the LUSA are compared with the results obtained by the MARS 2000.

Based on models, the optimization was done in DeMak program. In this thesis, the lower limit of the project variables are set according to the minimum local dimension calculated based on Harmonized rules. The objectives of the optimization were structural mass minimization with the maximization of the ultimate bending moment. The optimization results were analysed, along with the comparison of the initial prototype model and the model chosen after optimization.

Key words:

ultimate strength, multi-criteria decision making, optimization

1. Uvod

Uzdužna čvrstoća trupa broda zbog svog značaja za sigurnost samog broda promatra se kao primarna čvrstoća broda. Klasifikacijska društva su kroz udruhu International Association of Classification Societies (IACS) oformila zajednička pravila, vezana i uz graničnu uzdužnu čvrstoću, a koja se primjenjuju za brodove za rasuti teret i tankere za prijevoz nafte. Zadovoljavanje granične uzdužne čvrstoće trupa broda važan je kriterij podobnosti. Do uzdužne granične čvrstoće može se doći na više načina, a klasifikacijska društva preporučavaju inkrementalno-iterativni pristup pri analizi progresivnog kolapsa zasnovan na Smithovoj metodi. U ovom radu je uzdužna granična čvrstoća računata pomoću programa MARS, te pomoću modula LUSA. Oba načina proračuna granične čvrstoće podliježu zahtjevima Harmoniziranih pravila.

Brodovi će uvijek u službi biti izloženi sudarima i nasukavanju. To su pojave koje ne možemo eliminirati proračunima. Sa strane sigurnosti ovo je ozbiljan problem, jer pri takvim nesrećama može doći do gubitka dobara, zagađenja okoliša ili smrtnih slučajeva. Novi kriterij pri provjeri uzdužne granične čvrstoće kojeg nalažu Harmonizirana pravila je provjera uzdužnog graničnog momenta ne samo za neoštećeni trup broda, nego i za brodski trup sa oštećenjem dna, odnosno oštećenjem boka. Do kolapsa broskog trupa pri ovakvim oštećenjima dolazi zbog manjka uzdužne čvrstoće trupa, pa se konstrukcija više ne može nositi sa narinutim opterećenjem. Proračun uzdužne čvrstoće za oštećen brod od velike je koristi za slučaj da dođe do sudara ili nasukavanja, jer u tom trenutku rezultati takvih proračuna mogu biti ključni za sprječavanje daljnjeg napredovanja oštećenja, te na taj način spasiti brod od potpunog kolapsa.

Velik opseg radnih zadataka projektanta rezultirao je potrebom za razvijanjem računalnih paketa koji će omogućiti brže i efikasnije pronalaženje kvalitetnih projekata. Takvi paketi omogućavaju vršenje optimizacije koja ovisno o zadanim ciljevima nudi najbolja rješenja, a u ovom radu prema zadanim ciljevima tražila se najefikasnija konstrukcija s obzirom na uzdužnu graničnu čvrstoću pomoću optimizacijskog paketa DeMak, a pri tome da je masa minimizirana.

2. Zahtjevi za proračun uzdužne granične čvrstoće trupa broda prema pravilima IACS H-CSR[1]

Prema IACS Pravilima, vertikalni granični moment savijanja trupa mora zadovoljiti sljedeći kriterij:

$$M \leq \frac{M_U}{\gamma_R} \quad (2.1)$$

gdje je M_U granični moment savijanja trupa koji predstavlja maksimalnu izdržljivost trupa broda uslijed savojnog vlačnog ili tlačnog opterećenja, proračunat za potrebe ovog rada analizom u programu LUSA. M je najveći dopušteni vertikalni moment savijanja, a γ_R je faktor sigurnosti za vertikalni granični moment savijanja trupa koji uzima u obzir nesigurnost vezanu uz svojstva materijala i nesigurnost vezanu uz samu točnost metode određivanja granične čvrstoće

Korekcijski faktor sigurnosti γ_R umnožak je parcijalnih faktora, γ_M koji uzima u obzir svojstva materijala, neizvjesnosti predviđanja geometrijskih svojstava i čvrstoće, te mu se vrijednost uzima 1.1, i faktora γ_{DB} koji uzima u obzir efekt savijanja dvodna, te mu se vrijednost uzima za tankere u slučaju pregiba 1.1, u slučaju progiba 1.0, a u oba ta slučaja ako je došlo da naplavljivanja faktor γ_{DB} će se uzeti 1.0.

$$\gamma_R = \gamma_M \gamma_{DB} \quad (2.2)$$

M je definiran kao zbroj momenata savijanja na mirnoj vodi M_{SW-U} i momenata savijanja na valovima M_W :

$$M = \gamma_S M_{SW-U} + \gamma_W M_W \quad (2.3)$$

γ_S i γ_W su parcijalni faktori sigurnosti za na mirnoj vodi i na valovima koji uzimaju u obzir nesigurnost vezanu uz nedovoljno poznavanje momenta broskog trupa na mirnoj vodi i na valovima (nesigurnost proračuna valnih opterećenja). γ_S za tanker ima vrijednost 1.0, a γ_W poprima vrijednost 1.2, odnosno 1.3, ovisno o primjenjenom opterećenju.

Minimalni vertikalni moment savijanja na mirnoj vodi je definiran za uvjete pregiba:

$$M_{SW-U-h} = f_{SW} (171 C_W L^2 B (C_B + 0.7) 10^{-3} - M_{WV-h}) \quad (2.4)$$

te za uvjete progiba:

$$M_{sw-U-s} = -0.85 f_{sw} (171 C_w L^2 B (C_B + 0.7) 10^{-3} - M_{wv-s}) \quad (2.5)$$

gdje je f_{sw} faktor distribucije po dužini broda, za poziciju glavnog rebra vrijednosti 1.0, C_w valni koeficijent, L duljina broda, B širina broda, C_B koeficijent istisnine. C_w se za brodove duljine veće od 90 m i manje od 300 m uzima:

$$C_w = 10.75 - \left(\frac{300-L}{100} \right)^{1.5} \quad (2.6)$$

Vertikalni moment savijanja na valovima definiran je prema izrazu:

$$M_{wv-h} = 0.19 f_{nl-vh} f_m f_p C_w L^2 B C_B \quad (2.7)$$

za pregib, a za progib:

$$M_{wv-s} = -0.19 f_{nl-vs} f_m f_p C_w L^2 B C_B \quad (2.8)$$

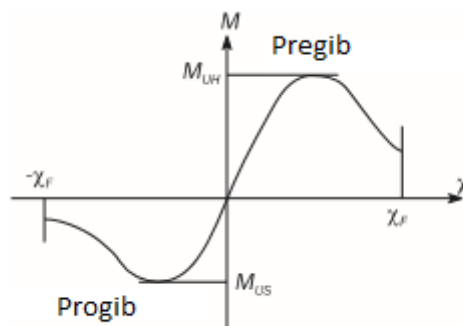
Pritom je f_{nl-vh} koeficijent koji uzima u obzir nelinearne efekte kod pregiba, vrijednosti 1.0, a f_{nl-vs} koeficijent koji uzima u obzir nelinearne efekte kod progiba, te se kod proračuna čvrstoće računa prema izrazu:

$$f_{nl-vs} = 0.58 \left(\frac{C_B + 0.7}{C_B} \right) \quad (2.9)$$

Koeficijent za proračun čvrstoće kod ekstremnih morskih uvjeta opterećenja $f_p = f_{ps}$ uzima se 1.0, a f_{sw} koji je faktor distribucije vertikalnog momenta savijanja na valovima po dužini broda, za poziciju glavnog rebra, uzima se 1.0. Svi momenti proračunavaju se za uvjete pregiba i progiba i to na poprečnom presjeku glavnog rebra.

Rezultat proračuna graničnog momenta daje nam razinu rezerve sigurnosti koju imamo s obzirom na globalno projektno opterećenje.

Kod uzdužnog sloma brodskog trupa prevladavajuće opterećenje je moment savijanja, a glavni odziv je savijanje. To se izražava putem zakrivljenosti grede χ .



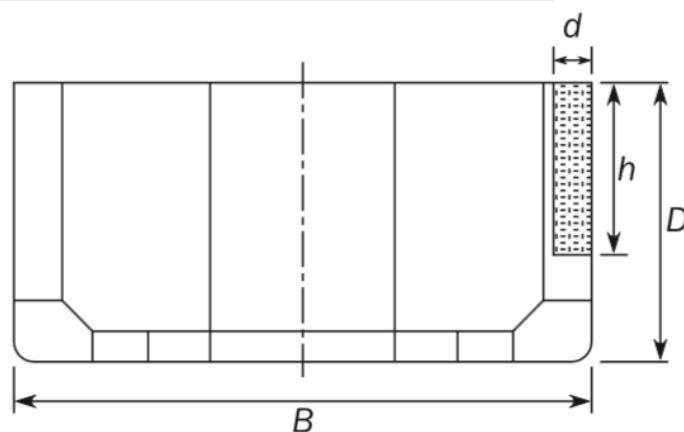
Slika 1. Krivulja ovisnosti momenta savijanja o zakrivljenosti trupa [1]

2.1. Proračun uzdužne čvrstoće broda u oštećenom stanju

Za proračun čvrstoće poprečnog presjeka trupa uslijed oštećenja boka broda, pretpostavlja se da je oštećenje konstrukcije smješteno na jednom boku i neposredno uz palubu. Opseg oštećenja prikazan je u tablici 1. te na slici 2.

Tablica 1. Opseg oštećenja kod sudara[1]

Damage penetration, in m	Side shell arrangement	
	Single side	Double side
Height, h	$0.75 D$	$0.60 D$
Depth, d	$B/16$	$B/16$

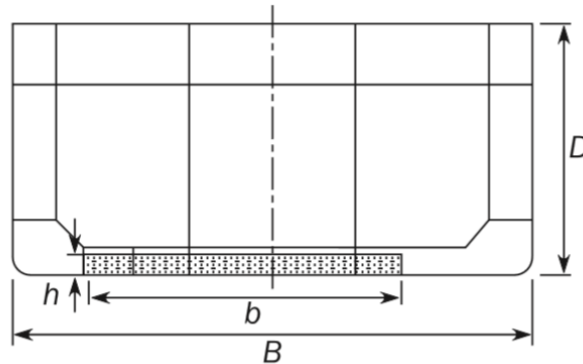


Slika 2. Opseg oštećenja kod sudara[1]

Za proračun čvrstoće poprečnog presjeka trupa uslijed oštećenja dna broda, pretpostavlja se da je oštećenje konstrukcije smješteno na najnepovoljnijoj poprečnoj poziji na dnu. Opseg oštećenja prikazan je u tablici 2. te na slici 3.

Tablica 2. Opseg oštećenja kod nasukavanja[1]

Damage penetration, in m	Bulk carriers	Oil tankers
Height, h	Min ($B / 20, 2$)	Min ($B / 15, 2$)
Breadth, b	$0.60 B$	$0.60 B$



Slika 3. Opseg oštećenja kod nasukavanja[1]

Vertikalni granični moment savijanja trupa u oštećenom stanju mora zadovoljiti sljedeći zahtjev:

$$M_D \leq \frac{M_{UD}}{\gamma_{RD} C_{NA}} \quad (2.10)$$

gdje je M_D vertikalni moment savijanja trupa u oštećenom stanju, M_{UD} vertikalni granični moment savijanja trupa u oštećenom stanju, proračunat za potrebe ovog rada analizom u programu LUSA, γ_{RD} parcijalni faktor sigurnosti za vertikalni granični moment trupa u oštećenom stanju, vrijednosti 1.0, a C_{NA} koeficijent neutralne osi, koji u slučaju sudara iznosi 1.1 za pregib, te 1.0 za progib, a u slučaju nasukavanja iznosi 1.0 i za pregib i za progib.

Vertikalni moment savijanja trupa u oštećenom stanju računa se prema izrazu:

$$M_D = \gamma_{sd} M_{sw-D} + \gamma_{wd} M_{wv} \quad (2.11)$$

gdje je M_{sw-D} dozvoljeni moment savijanja na mirnoj vodi, te se računa prema izrazu (2.4) za slučaj pregiba, ili prema izrazu (2.5) za slučaj progiba, M_{wv} vertikalni moment savijanja na valovima, te se računa prema izrazu (2.7) za pregib, ili prema (2.8) za progib. Parcijalni faktor sigurnosti na mirnoj vodi u oštećenom stanju γ_{sd} uzima se 1.1, a parcijalni faktor sigurnosti na valovima u oštećenom stanju γ_{wd} uzima se 0.67.

2.2. Parametar podobnosti

Parametar podobnosti g definira nam odnos zahtjeva D i izdržljivosti C neke veličine čiju podobnost je potrebno odrediti. Definira se prema idućoj formuli:

$$g = \frac{C-D}{C+D} \quad (2.11)$$

U formuli C predstavlja izdržljivost, a D predstavlja ono što se zahtjeva da bude zadovoljeno. Parametar podobnosti može poprimiti vrijednosti od -1 do $+1$. Vrijednost -1 poprimiti će ako je C jednako nuli, a $+1$ ako je D jednako nuli. Podobnost je zadovoljena kada je parametar u području pozitivnih vrijednosti.

Parametar podobnosti za granični moment savijnja trupa broda definiran je formulom:

$$g = \frac{M_U - M_D}{M_U + M_D} \quad (2.12)$$

3. Inkrementalno – iterativna metoda analize progresivnog kolapsa[2]

Kolaps nosive konstrukcije općenito se može definirati kao granično stanje nosivosti pri kojem konstrukcija gubi sposobnost otpora narinutom vanjskom opterećenju (vlačenje/tlačenje, savijanje, smik, uvijanje). Do uzdužnog globalnog kolapsa dolazi gubitkom nosivosti uzdužno orijentiranih nosivih elemenata konstrukcije pri čemu dolazi do značajnog smanjenja krutosti konstrukcije pri osnom opterećenju, savijanju, smiku ili uvijanju.

Brodski trup je trodimenzionalno tijelo, tankostijeni kutijasti nosač, za koji se pomoću teoretskog modela dvodimenzionalne apsolutno krute grede iz opće nauke o čvrstoći opisuje problem uzdužne čvrstoće broda. Ovakva idealizacija realnih problema prihvaćena je iz razloga složenosti samog problema kojeg nedovoljno poznajemo i teško nam ga je teoretski obuhvatiti pouzdanim i provjerenim postupcima. Brod projektiramo s ciljem da konstrukcija izdrži sve slučajeve opterećenja kojima je brod izložen tokom službe.

3.1. Teorijske osnove

Postupak ove metode oslanja se na inkrementalno-iterativni postupak naveden u zajedničkim propisima uzdužne čvrstoće IACS-a.

Narinuta zakrivljenost trupa izaziva uzdužne deformacije strukturnih elemenata. Vrijednosti deformacija ovise o vertikalnoj udaljenosti elementa od neutralne linije poprečnog presjeka. Naprezanja kojima su elementi izloženi određuju se u nelinearnom elasto-plastičnom području pomoću šest krivulja koje predočavaju odnos naprezanja i deformacije.

U metodi, inkrementalni dio odnosi se na postupno povećavanje zakrivljenosti trupa broda koji se promatra kao greda, a iterativni dio odnosi se na određivanje novog položaja neutralne linije presjeka trupa za svaki korak. Moment i-tog koraka određuje se zbrajanjem doprinosa momentu savijanja svih elemenata u tom koraku.

Rezultat postupka je krivulja momenta u ovisnosti o zakrivljenosti. Iz krivulje je lako vidljiv maksimalni moment za slučaj progiba kada mu je predznak negativan, te za slučaj pregiba kada mu je predznak pozitivan.

U propisima IACS-a [1] navedeni su glavni koraci Inkrementalno-iterativnog postupka:

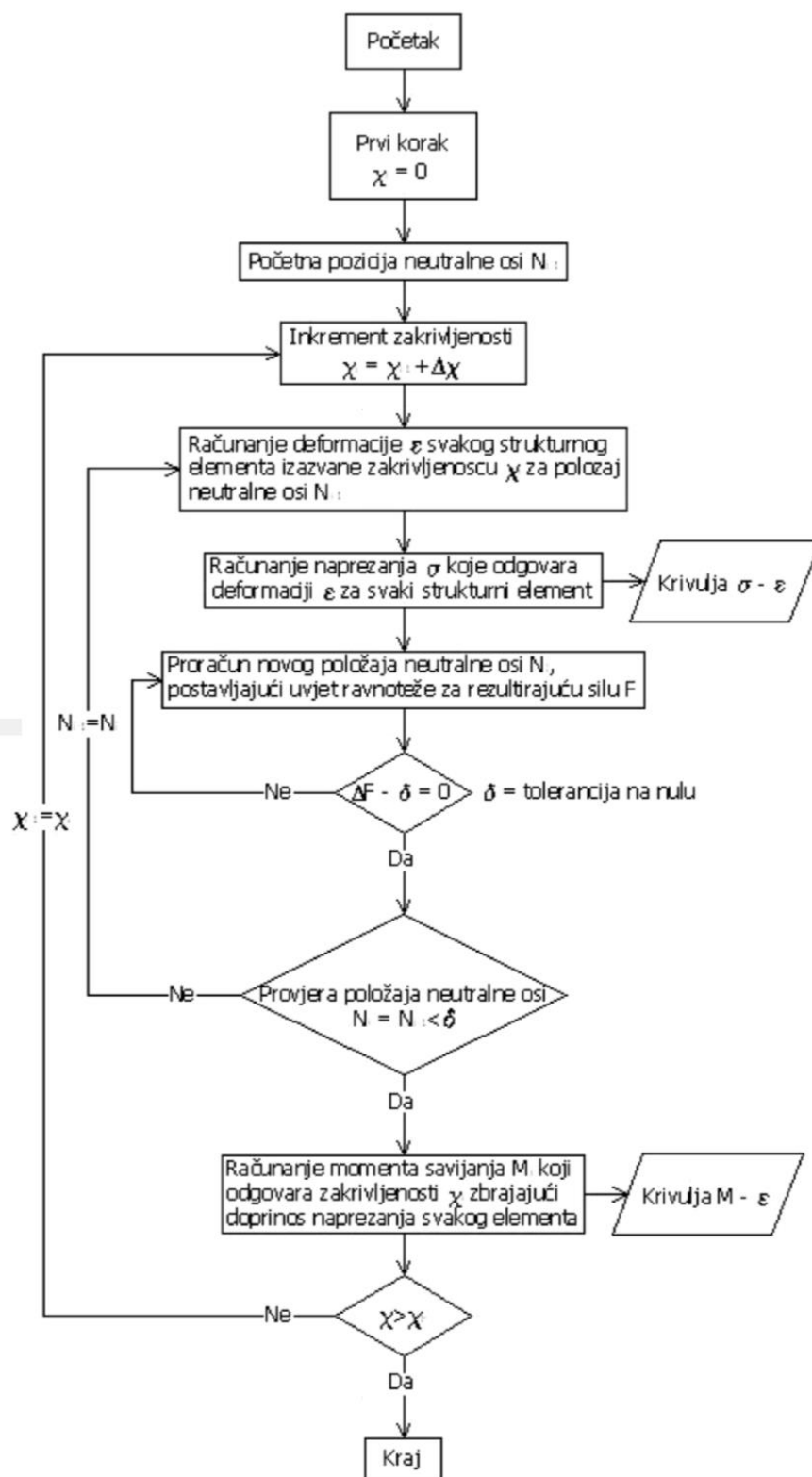
1. Podjela poprečnoga presjeka na elemente ukrijepljenih panela
2. Određivanje neutralne osi za nedeformiranu strukturu
3. Definicija odnosa naprezanje–deformacija za sve elemente
4. Početak postupka određivanjem početne zakrivljenosti
5. Određivanje odgovarajućeg naprezanja za svaki element
6. Nalaženje nove neutralne osi postavljanjem uvjeta ravnoteže preko cijeloga presjeka
7. Račun ukupnog momenta savijanja zbrajanjem doprinosa svih elemenata momentu savijanja.

Početna zakrivljenost određuje se iz izraza:

$$\chi_0 = 0,01\varepsilon_y \quad (3.1)$$

u kojem je ε_y deformacija popuštanja koja uzima u obzir gornju granicu razvlačenja i modul elastičnosti [3]:

$$\varepsilon_y = \frac{Re^H}{E} \quad (3.2)$$



Slika 4. Algoritam numeričkog rješavanja proračuna graničnog momenta savijanja [3]

Brodski trup se idealizira Euler-Bernoullijevom gredom složenog tankostjenog poprečnog presjeka na temelju čega se dobiva odnos momenta savijanja M i zakrivljenosti grede κ .

Za ovakvu idealiziranu gredu vrijedi diferencijalna jednadžba savijanja:

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(EI_y \frac{d^2 w_0(x)}{dx^2} \right) = q_z(x) \quad (3.3)$$

U jednadžbi (3.3) [2] $q_z(x)$ predstavlja uzdužnu raspodjelu kontinuiranog opterećenja u smjeru poprečne osi z . Integral od $q_z(x)$ po duljini grede daje za rezultat uzdužnu raspodjelu smične sile $Q_z(x)$. Nadalje, integral od $Q_z(x)$ po duljini grede daje za rezultat raspored momenta savijanja $M_y(x)$ oko osi y .

$$M_y(x) = -EI_y \frac{d^2 w_0(x)}{dx^2} \quad (3.4)$$

$$M_y(x) = -EI_y \kappa_L \quad (3.5)$$

U jednadžbi (3.4) [2] za raspored momenta savijanja $M_y(x)$, EI_y predstavlja krutost na savijanje, a w_0 je poprečni pomak čija druga derivacija daje zakrivljenost grede κ_L .

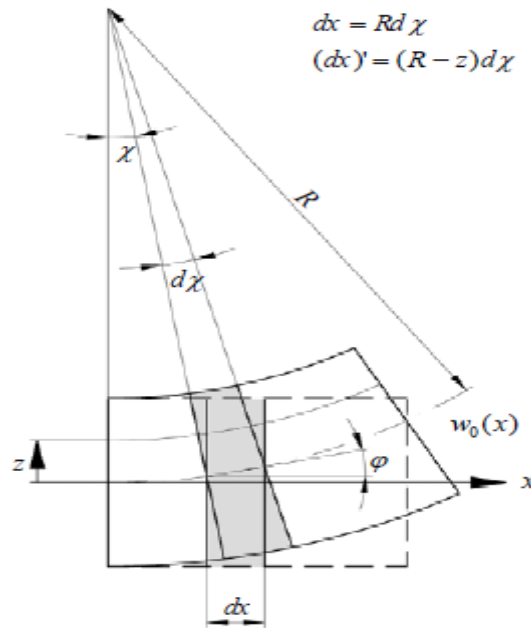
Kod Euler-Bernoullijeve grede duljina diferencijalnog dijela dx ostaje ista i nakon deformiranja. U deformiranom stanju diferencijalni element poprimiti će oblik kružnog luka za koji vrijedi $dx = R d\chi$. Uz jednakost kuta zakreta i priklonog kuta, $\chi = \varphi$, te za mali prikolni kut φ [6] vrijedi :

$$\varphi = \tan \varphi = \frac{dw_0}{dx} \quad (3.6)$$

Pa slijedi:

$$\kappa_L = \frac{1}{R} = \frac{d\chi}{dx} = \frac{d\varphi}{dx} = \frac{d^2 w_0(x)}{dx^2} \quad (3.7)$$

Prva derivacija poprečnog pomaka w_0 po uzdužnoj koordinati jednaka je kutu φ , a druga derivacija daje nam lineariziranu fizikalnu zakrivljenost grede κ_L .



Slika 5. Savijanje Euler-Bernoullijeve grede [2]

Iz razmatranja diferencijalnog uzdužnog segmenta grede u nedeformiranom i deformiranom stanju može se dobiti [2] poprečni raspored uzdužnih linijskih deformacija po visini grede:

$$\varepsilon_{xL} = -z\kappa_L \quad (3.8)$$

Za tijelo u stanju ravnoteže vrijedi da je i svaki njegov dio u stanju ravnoteže, pa deformaciju uslijed narinutog opterećenja je moguće promatrati na jednom uzdužnom segmentu grede koji je ograničen poprečnim nosačima. Uz poznatu veza između uzdužne linijske deformacije i naprezanja pojedinog diferencijalnog elementa na poprečnom presjeku može se odrediti unutarnja uzdužna sila prema [2]:

$$dN = \sigma_x dA \quad (3.9)$$

Iz uvjeta ravnoteže slijedi jednakost rezultante sile vlačne i tlačne zone, te je moguće odrediti novi položaj neutralne osi. Ukupni moment unutrašnjih uzdužnih sila [3] oko promatrane neutralne osi dobije se integriranjem svih produkata diferencijalnih sila i pripadajućih krakova po površini uravnoteženog poprečnog presjeka :

$$M_y(x) = \int_A \sigma_x z dA \quad (3.10)$$

Kod većih vrijednosti razmatranog raspona linearizirane fizikalne zakrivljenosti izlazi se iz linearne elastičnosti i prelazi na rješavanje problema u nelinearnoj elasto-plastičnoj domeni.

Uz prisutno opterećenje postupno dolazi do smanjenja nosivosti strukturnih elemenata, odnosno popuštanja, pa se mijenja i rezultirajući moment unutarnjih uzdužnih sila. Zato odnos između narinute zakrivljenosti i odgovarajućeg momenta nije linearan unutar razmatranog raspona intenziteta savijanja, pa pri progresivnom povećanju zakrivljenosti prirast momenta se sve više smanjuje te nakon dostizanja granične vrijednosti postaje negativan, a iz formule (3.5) je vidljivo da je smanjena i krutosti na savijanje razmatranog poprečnog presjeka.

3.2. Diskretizirani model

Svi elementi uzdužnog segmenta konstrukcije koji sudjeluju u uzdužnoj nosivosti diskretiziraju se u tri međusobno povezana elementa:

- Grede tankostjenog presjeka- uzdužne ukrepe sa pridruženom sunosivom širinom oplata
- Kruti kutovi- spojevi uzdužne oplata koji ne stoje u istoj ravnini, odnosno spojevi dva elementa koji međusobno zatvaraju pozitivan ili negativan kut do najviše 270°. Ovi dijelovi gube nosivost isključivo popuštanjem materijala
- Poprečno orebrena oplata- radi se o uzdužno orebrenoj oplati za koju je razmak uzdužnog orebrenja određen poprečnim orebrenjem

Duljina svih elemenata segmenta definirana je uzdužnim razmakom između jakih poprečnih nosača.

3.3. Krivulje naprezanje-deformacija $\sigma - \varepsilon$

Za opisivanje ponašanja diskretiziranih elemenata modela, pri procesu sloma broskog trupa uslijed tlačnog ili vlačnog opterećenja, te u ovisnosti o poziciji elementa u odnosu na neutralnu liniju poprečnog presjeka, služi šest krivulja koje predočavaju odnos srednjeg naprezanja i deformacija za razne modove oštećenja:

- Elasto –plastični slom (popuštanje)

- Globalno gredno-štapno izvijanje
- Torzijsko izvijanje
- Lokalno izvijanje struka složenih ukrepa s pojasom
- Lokalno izvijanje struka plosnih ukrepa (bez pojasa)
- Izvijanje opločenja

U tablici 3. prikazan je mogući način gubitka nosivosti za pojedine diskretne elemente.

Tablica 3. Načini gubitka nosivosti pojedinih diskretnih sastavnih elemenata

Vrsta diskretnog sastavnog elementa:	Mogući način(i) gubitka nosivosti:
Vlačno/tlačno opterećena tankostjena greda, kruti kut, neukrepljena oplata	Elasto-plastični kolaps (popuštanje)
Tlačno opterećena tankostjena greda	Elasto-plastični kolaps (popuštanje); Globalno gredno-štapno izvijanje; Globalno lateralno-uvojno izvijanje; Lokalno izvijanje struka ukrepe s pojasom; Lokalno izvijanje struka ukrepe bez pojasa
Tlačno opterećena oplata	Izvijanje oplata

3.4. Granični moment savijanja i kolapsna sekvenca

Kod analize progresivnog kolapsa razmatra se uzdužna granična nosivost konstrukcije za slučaj savijanja kod pregiba i progiba. Za svaki korak razmatran pri analizi može se uzdužna nosivost globalno promatrati za cijeli poprečni presjek, ali i lokalno za svaki diskretizirani element. To omogućuje praćenje promjena raspodjele prosječnog uzdužnog normalnog naprezanja za različite inkremente kod progresivnog povećanja intenziteta savijanja.

Numeracija koja odgovara opisu vrste kolapsa u LUSA izlaznim datotekama [4]:

1. Tlačni elasto-plastični kolaps
2. Vlačni elasto-plastični kolaps
3. Globalno gredno-štapno izvijanje

4. Torzijsko izvijanje
5. Lokalno izvijanje struka ukrepe sa pojasom
6. Lokalno izvijanje struka ukrepe bez pojasa
7. Izvijanje oplata

4. Osnove optimizacijskog problema i optimizacijske metode [5]

Projektiranje složenih tankostjenih konstrukcija predstavlja složen, nelinearan problem, koji je teško izraziti analitički, te je zbog toga većina optimizacijskih metoda numeričko-iterativnog tipa te zahtijeva uporabu računala. Optimizacijski postupak [6] uvodi sistematsku metodologiju za određivanje vrijednosti projektnih varijabli koji maksimiziraju ili minimiziraju zadanu mjeru kvalitete (projekta) i istovremeno zadovoljavaju projektna ograničenja. Projektni problem najčešće se definira izrazom:

$$\begin{aligned} & \min f(x_i) \\ x \in R^n : & \quad h_j(x_i) = 0 \quad , j = 1, \dots, n_h, \\ & \quad g_k(x_i) \geq 0 \quad , k = 1, \dots, n_g, \\ & \quad x_{il} \leq x_i \leq x_{iu}. \end{aligned} \tag{4.1}$$

gdje su:

x – projektne varijable

f – funkcija cilja

h – ograničenja jednakosti

g – ograničenja nejednakosti

U idućem potpoglavlju bit će detaljnije prikazana formulacija optimizacijskog problema na način kako je izvedena u sustavu OCTOPUS Designer te osnovni koncepti vezani za višeciljnu optimizaciju. Nakon toga slijedit će opis optimizacijske metode korištene u ovom radu. Na kraju ovog poglavlja nalazi se opis indikatora kvalitete Pareto fronte.

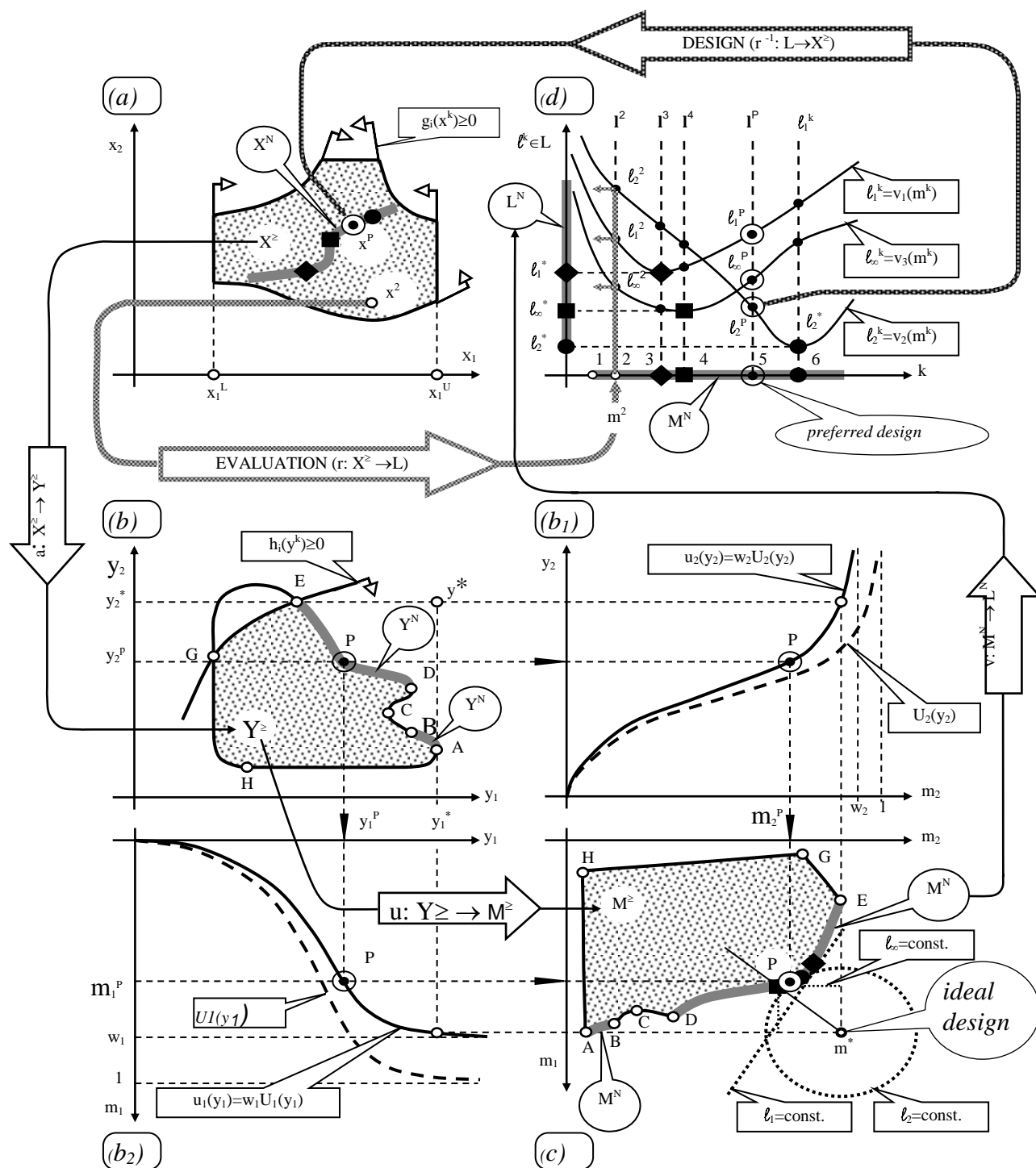
4.1. Definicija projektnog problema

Matematička definicija projektnog problema, prema [7] unutar OCTOPUS Designer okruženja vrši se unutar definicijskog modula (Δ). Modul Δ zahtjeva definiciju projektnih parametara, mjera kvalitete projekta ("izvrsnost" - ključni indikatori performansi) te ograničenja.

Projektni parametri (deskriptori) $\mathbf{d} = \{\mathbf{X}, \bar{\mathbf{x}}\}$ uključuju projektne varijable \mathbf{x} , za koje je odgovoran projektant i taktičke/tehničke konstante $\bar{\mathbf{x}}$ koje su redovito definirane unutar projektnog problema (tzv. profil zadatka)

Mjere kvalitete projekta definirane su pomoću skupa funkcija preslikavanja (mappings), a neke od tipičnih kriterijskih funkcija su: cijena, masa, sigurnost itd.

Potpuni opis prostora i transformacija korištenih unutar OCTOPUS-a dani su na slici 6. (a-d). da bi se dobio bolji vizualni uvid u susretane pojmove/koncepte u višekriterijskom projektiranju.



Slika 6. Osnovna formulacija potpore procesu odlučivanja [7]

4.2. Projektni prostor

Projektni prostor \mathbf{X} na slici 6.-a. je prostor razapet između projektnih varijabli x_i , $i=1, \dots, nv$. Kod strukturnih problema projektne varijable \mathbf{x} su obično strukturni elementi definirani unutar osnovnog (Φ) fizičkog modula, zajedno sa svojim projektnim granicama x_i^U i x_i^L .

Svaki projekt k je predstavljen s točkom $\mathbf{x}^k = \{x_i\}$ (tj. \mathbf{x}^2 ili \mathbf{x}^p) unutar projektnog prostora \mathbf{X} . Projekti unutar pod-prostora (podskupa ukoliko je k konačan broj) podobnih rješenja \mathbf{X}^\geq moraju zadovoljavati dani skup funkcija ograničenja $g_i(\mathbf{x}) \geq 0$, tehnoloških ili funkcionalnih zahtjeva te ostalih ograničenja. Potrebno je primijetiti da prostor \mathbf{X}^\geq može biti konveksan (linija koja spaja dva projekta leži unutar \mathbf{X}^\geq) ili ne konveksan kako je prikazano na slici 6.-a. Isto tako može se dogoditi da prostor \mathbf{X}^\geq bude višestruko povezan (prostor sadržava rupe npr. zbog izbjegavanja pojave rezonancije kod vibracijskih problema), nadalje možemo imati diskretizirane projektne varijable (broj kontejnera, broj ukrepa, standardni profili itd.). Takvi zahtjevi onda značajno utječu na definiciju optimizacijskog problema.

4.3. Atributni prostor

Atributni prostor \mathbf{Y} - vidi slici 6.-b. je razapet između projektnih atributa y_i , dok se funkcije $y^k = a(\mathbf{x}^k)$ ili $a: \mathbf{X}^\geq \rightarrow \mathbf{Y}^\geq$ koriste za formiranje atributnog prostora $\mathbf{Y}^\geq = \{y^k\}$. Za svako podobno rješenje \mathbf{x}^k u \mathbf{X} mjere kvalitete rješenja $\mathbf{y}^k = \{y_i\}$ definiraju odgovarajuću točku u \mathbf{Y} prostoru.

Potrebno je naglasiti da nekoliko rješenja u \mathbf{X} prostoru mogu definirati jednu jedinu točku u \mathbf{Y} prostoru (ista cijena, sigurnost itd.). Isto tako potrebno je napomenuti da vrijednosti x_i ili y_i nisu međusobno usporedive te imaju različite jedinice. Zbog toga \mathbf{X} i \mathbf{Y} nisu metrički prostori tj. nemoguće je izračunati udaljenosti između projekata te je upravo iz tih razloga usporedba jedino moguća za svaki x_i ili y_i zasebno.

Ukoliko je određen smjer poboljšanja kvalitete (tj. minimalna cijena, maksimalna sigurnost), atributi se transformiraju u ciljeve (atributi sa smjerom). Tada možemo odrediti i "Idealno" rješenje \mathbf{y}^* koje ima koordinate s vrijednostima najbolje ostvarene kvalitete za svaki cilj.

4.4. Definicija koncepta nedominiranosti

Na slici 6.-a i 6.-b. pod-prostor \mathbf{Y}^N sastavljen od nedominiranih / Pareto optimalnih / efikasnih projekata može se definirati tek onda kada se na projekte u \mathbf{Y}^{\geq} prostoru primjene projektantove preferencije prema određenim aspektima kvalitete. Tada ti projekti (obično samo mali dio svih podobnih projekata) postaju fokus pažnje projektanta, pošto dominiraju nad ostalim podobnim projektima.

Sklonost / preferiranost je binarni odnos kojim se projektni atribut y_i preferira nad y_j . Takozvani "bolji skup" se može definirati u odnosu na dani projekt \mathbf{y}^0 ukoliko su svi atributi preferirani u odnosu na \mathbf{y}^0 . Obrnuto se može reći da je "lošiji skup" onaj skup koji sadržava sve projekte lošije od \mathbf{y}^0 po svim atributima tj. projekti su dominirani od strane \mathbf{y}^0 . Konačno skup nedominiranih projekata \mathbf{Y}^N je definiran kao skup koji nema bolji skup od sebe, tj. nije dominiran od strane nijednog projekta. Alternativno se možemo izraziti da je projekt nedominiran ukoliko je bolji od svih drugih projekata u \mathbf{Y}^{\geq} prostoru bar po jednom cilju. Projekti u \mathbf{Y}^N prostoru imaju definirane projektne varijable u \mathbf{X}^N prostoru (vidi sliku 6.-a.).

4.5. Optimizacija rojem čestica

U nastavku je dan opis optimizacijske metode korištene, i to prvo osnovnog algoritma namijenjenog za jednociljnu optimizaciju bez ograničenja, a nakon toga proširenja za višeciljnu optimizaciju i rad s ograničenjima.

4.5.1. Osnovni algoritam optimizacija rojem čestica (*Particle swarm optimization- PSO*)

Osnovna ideja PSO algoritma prezentirana u [8] proizlazi iz činjenice da na kretanje (let) svake pojedinačne čestice u cijeloj populaciji (roju) kroz projektni i atributni prostor utječu najbolji projekti (lokacije) nađeni do trenutne iteracije od strane čestice kao i cijelog roja.

Osnovni PSO algoritam možemo prikazati kroz 6 koraka (slika 7.)

KORAK 1: Inicijalizacija roja - nakon inicijalizacije roja čestice se obično nasumično rasporede po projektnom prostoru te se zatim svakoj čestici u odnosu na njezinu trenutnu lokaciju pridružuje mjera kvalitete koju zovemo dobrotom rješenja (*fitness*). Uobičajeni način za dobivanje početnih lokacija čestica dan je sljedećom jednačbom:

$$^i x_{k=0}^j = x_{\min}^j + r \cdot (x_{\max}^j - x_{\min}^j) \quad (4.2)$$

x - projektna varijabla

$i = 1, \dots, N_p$ - razmatrana čestica

$j = 1, \dots, N_{DV}$ - trenutna projektna varijabla

r - slučajan broj između 0 i 1

k - trenutna iteracija

Početna brzina svake čestice se može postaviti na 0 za svaku projektnu varijablu, ali isto tako se može upotrijebiti sljedeći izraz:

$$^i v_{k=0}^j = \frac{x_{\min}^j + r \cdot (x_{\max}^j - x_{\min}^j)}{\Delta t} \quad (4.3)$$

gdje je:

v - brzina čestice

Δt - inkrement vremena (u većini slučajeva koristi se 1)

KORAK 2: Izbor najboljih vlastitih i globalnih vodiča potrebnih za izračun brzine u KORAKU 3. Potrebno je da svaka čestica izabere svoju vlastitu najbolju lokaciju ($^i p^j$)

pronađenu do trenutne iteracije te isto tako odabere najbolju globalnu lokaciju (${}^g p^j$) pronađenu od strane cijelog roja do trenutne iteracije.

KORAK 3: Izračun nove brzine za svaku česticu u roju, prema izrazu:

$${}^i v_{k+1}^j = w^i v_k^j + c_1 \cdot r_1 \frac{({}^i p^j - {}^i x_k^j)}{\Delta t} + c_2 \cdot r_2 \frac{({}^g p_k^j - {}^i x_k^j)}{\Delta t} \quad (4.4)$$

${}^i p$ - najbolja lokacija pronađena od strane razmatrane čestice

${}^g p$ - najbolja (globalna) lokacija pronađena od strane roja

w - inercijski parametar

c_1 - kontrolni parametar komponente vlastite brzine

c_2 - kontrolni parametar komponente globalne brzine

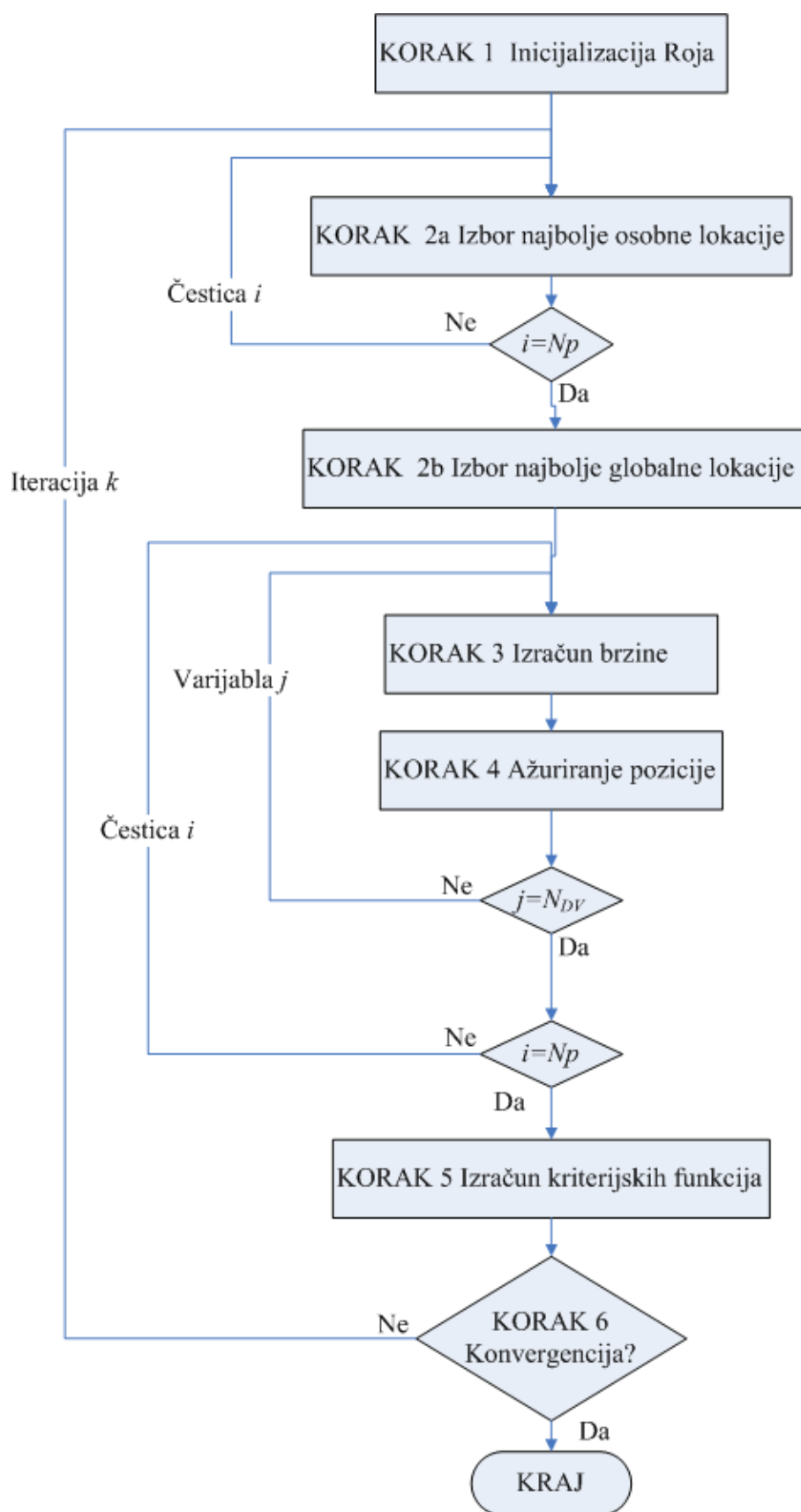
r_1, r_2 - slučajni brojevi između 0 i 1

Iz jednadžbe brzine možemo vidjeti da se brzina svake čestice sastoji od tri komponente:

$w^i v_k^j$ - inercijska komponenta

$c_1 \cdot r_1 \frac{({}^i p^j - {}^i x_k^j)}{\Delta t}$ - vlastita komponenta

$c_2 \cdot r_2 \frac{({}^g p_k^j - {}^i x_k^j)}{\Delta t}$ - globalna komponenta



Slika 7. Dijagram toka osnovnog PSO algoritma

Kako se može vidjeti iz gore navedenih formula kretanjem čestice se upravlja pomoću: brzine iz prethodnog koraka, vlastitim znanjem čestice - vlastita najbolja lokacija i globalnim znanjem roja - najbolja lokacija pronađena od strane cijelog roja. Utjecaj pojedine komponente brzine može se podešavati preko kontrolnih parametara w, c_1, c_2 . Uobičajene vrijednosti kontrolnih parametara kreću se za w između 0.5 i 1.5 dok za c_1, c_2 između 1.5 i 2.5.

KORAK 4: Izračun novog položaja - pomoću brzine čestice dobivene iz prethodnog koraka, pronalazi se novi položaj čestice prema idućem izrazu:

$$^i x_{k+1}^j = ^i x_k^j + ^i v_{k+1}^j \cdot \Delta t \quad (4.5)$$

KORAK 5: Izračun dobrote rješenja - za novi položaj (lokaciju) vrši se izračun dobrote za svaku česticu.

KORAK 6: Provjera konvergencije - ukoliko je dostignut zadani broj iteracija ili zadovoljen kriterij konvergencije algoritam se zaustavlja, inače se ponavljaju koraci 2 do 6 sve dok se ne zadovolji jedan od uvjeta (broj iteracija odnosno kriterij konvergencije).

Gore opisani algoritam je predviđen za optimizacijske probleme bez ograničenja, ali postoje brojna proširenja algoritma koja omogućuju rad s ograničenjima. Veliki broj proširenja za rad s ograničenjima možemo pronaći u raznim evolucijskim algoritmima (nekoliko primjera implementacije možemo pronaći u [10] i [11]).

4.5.2. Prilagodba optimizacije rojem čestica za rad s višeciljnim problemima

Iako u svojoj osnovi PSO algoritam nije predviđen za rad s višeciljnim problemima, kroz proteklo desetljeće razvila su se brojna proširenja metode koja to omogućuju. U većini slučajeva upotrijebljene su i prilagođene već prije razvijene metode s područja višeciljnih genetskih algoritama ili višeciljnih evolucijskih strategija.

Kod optimizacije jednociljnog projektnog problema PSO optimizacijskim algoritmom, postoji samo jedno optimalno rješenje te je izbor globalnog i lokalnog vodiča za svaku česticu jednostavan i očit. Izbor je jednostavan pošto svaka čestica ima samo jedan lokalni i globalni

vodič. Prelaskom na višeciljnu optimizaciju javlja se novi problem, a to je skup nedominiranih rješenja koji se generira zbog višeciljnosti problema. Upravo zbog toga kod višeciljne PSO optimizacije izbor globalnog i lokalnog vodiča postaje mnogostruko kompliciran, tj. svaka čestica sada ima skup nedominiranih rješenja iz kojeg mora odabrati svog globalnog i lokalnog vodiča. Unutar programskog sustava OCTOPUS Designer-a implementirani su MOPSO algoritmi koji svaki na svoj specifičan način vrše odabir vodiča iz skupa nedominiranih rješenja, a to su na primjer: *Hypercube*, *Sigma* [9].

4.5.2.1. MOPSO Hypercube

Metoda je predstavljena od strane [11], koju su razvili na spoznajama iz *Multiobjective Evolutionary Algorithm* (MOEA) područja. Osnovna ideja metode je stvaranje i održavanje arhive za spremanje nedominiranih lokacija pronađenih od strane čestica, gdje će zatim jedna od tih nedominiranih lokacija postati globalni vodič. Za izbor globalnog vodiča iz arhive upotrijebljena je metoda koju je dana u [12]. Ideja metode je podjela atributnog prostora na ekvidistantnu mrežu, dijeljenjem svakog atributa sa zadanim brojem podjela. Segmenti tako dobivene ekvidistantne mreže zovu se hiperkocke (*hypercubes*) te su unutar njih smještaju nedominirane lokacije iz arhive. Odabir globalnog vodiča iz generiranih hiperkocki objašnjen je u nastavku poglavlja.

Nakon inicijalizacije roja (KORAK 1 na slika 7.) ili KORAK-a 6 slijedi generiranje hiperkocki. Da bi se generirala ekvidistantna mreža tj. hiperkocke, potrebno je pronaći minimalnu i maksimalnu vrijednosti svakog atributa iz trenutnog skupa nedominiranih rješenja te tako dobiveni raspon vrijednosti po atributu podijeliti s unaprijed zadanom granulacijom.

Nakon generiranja ekvidistantne mreže, neke će od hiperkocki sadržavati nedominirane lokacije iz arhive (nedominirani projekti). Takvim se hiperkockama zatim dodjeljuje mjera dobrote, koja se računa prema izrazu:

$$dobrota = \frac{10}{NP} \quad (4.6)$$

NP - broj čestica unutar hiperkocke

Hiperkocke koje ne sadrže lokacije iz arhive bivaju izbrisane. Kod Hypercube metode sve čestice imaju zajedničkog globalnog vodiča koji se odabire iz skupa nedominiranih lokacija spremljenih u arhivi (KORAK 2b na slici 7.). Izbor globalnog vodiča *RouletteWheelSelection* metodom temelji se na mjeri dobrote hiperkocke dobivene jednadžbom

(4.6), iz koje se vidi da gušće naseljene hiperkocke imaju manju vrijednost dobrote te prema tome imaju manju šansu da se iz njih odabere globalni vodič. Ukoliko u odabranoj hiperkocki ima više od jednog nedominiranog rješenja (što je gotovo uvijek slučaj), nasumično se odabire jedan od njih. Ovakvim načinom odabira vodiča osigurava se ujednačena popunjenost Pareto fronte pošto se daje veći značaj rjeđe naseljenim hiperkockama. Izbor lokalnog vodiča za svaku česticu (KORAK 2a na slici 7.) i svi ostali koraci izvode se jednako kao i u standardnom PSO. Procedura se ponavlja za svaku iteraciju sve dok se ne zadovolji jedan od kriterija konvergencije (KORAK 6 na slici 7.)

Mjera dobrote hiperkocke ujedno služi i za reduciranje arhive, gdje hiperkocke s manjom vrijednošću dobrote imaju veću šansu (*RouletteWheelSelection*) da iz njih budu odabrane nedominirane lokacije koje će se izbaciti iz arhive. Pošto se izbacila jedna nedominirana lokacija iz arhive a time ujedno i iz hiperkocke, tada se za nju ponovo izvrši proračun mjere dobrote i pokrene *RouletteWheelSelection* metoda. Postupak se ponavlja dok se ne postigne željena veličina arhive.

4.5.2.2. MOPSO Sigma

Sigma metoda predstavljena je u radu [13], s osnovnom idejom stvaranja sigma vektora pomoću kojih bi se razriješio problem odabira globalnog vodiča iz skupa nedominiranih lokacija spremljenih u arhivi, čime se povećava selekcijski pritisak koji usmjerava algoritam prema obećavajućim dijelovima podobnog prostora.

Pošto je izvršena inicijalizacija roja KORAK 1 ili KORAK 6 slike 7., slijedi izračun sigma vektora za svaku česticu, odnosno njenu trenutnu lokaciju prema jednadžbi:

$$\sigma = \begin{bmatrix} f_1^2 - f_2^2 \\ \vdots \\ f_i^2 - f_j^2 \end{bmatrix} \bigg/ \sum_{i=1}^{NA} f_i^2 \quad (4.7)$$

f_i - iznos dobrote

NA - broj atributa

$i = 1 \dots NA$

$j = 1 \dots NA$

$i \neq j$

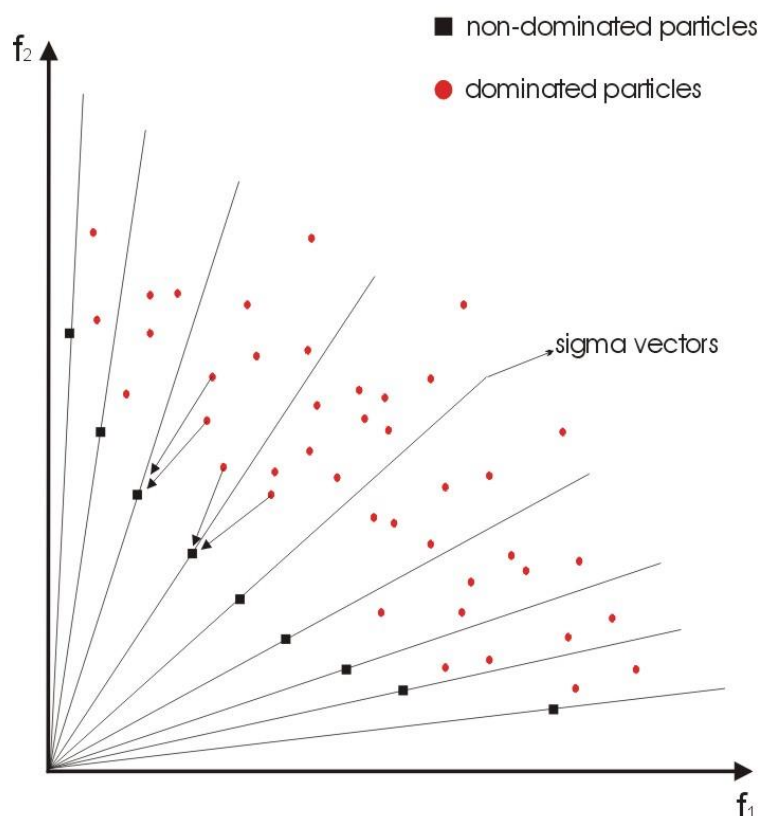
gdje je Sigma za jednociljni problem skalar dok za višeciljne probleme postaje vektor od $\frac{m}{2}$ elemenata (m je jednak broju atributa). Kod Sigma metode svaka čestica ima svog vlastitog globalnog vodiča, koji se odabire iz skupa nedominiranih lokacija spremljenih u arhivi (KORAK 2b na slici 7.). Izbor globalnog vodiča temelji se na računanju euklidskih udaljenosti između sigma vektora čestica iz trenutne iteracije, odnosno njene lokacije i sigma vektora nedominiranih lokacija iz arhivi, prema jednadžbi (4.8) - eksponent $p = 2$:

$$d = \left(|\sigma_i - \sigma_j|^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad (4.8)$$

$i = 1 \dots \text{broj dominiranih čestica}$

$j = 1 \dots \text{broj nedominiranih čestica}$

gdje je globalni vodič promatrane čestice najbliža nedominirana lokacija (vidi sliku 8.). Izbor lokalnog vodiča za svaku česticu (KORAK 2a na slici 7.) i svi ostali koraci izvode se jednako kao i u standardnom PSO.



Slika 8. Osnovni princip Sigma metode [9]

Procedura se ponavlja za svaku iteraciju sve dok se ne zadovolji jedan od kriterija - konvergencija KORAK 6.

4.5.3. Prilagodba algoritma za rad s ograničenjima

Kao što je moguće vidjeti u osnovnom algoritmu optimizacije rojem čestica, algoritam inicijalno ne uključuje način rada s ograničenjima. Isto tako niti jedan od navedenih načina proširenja metode ne objašnjavaju na koji način bi metode trebale raditi ukoliko se definiraju ograničenja. Zbog toga je navedene algoritme bilo neophodno modificirati kako bi se omogućilo da finalna Pareto rješenja budu podobna, odnosno da svako Pareto rješenje zadovoljava sva postavljena ograničenja.

Kod odabira najboljeg osobnog vodiča (najbolja vlastita lokacija) MOPSO optimizacijski algoritam koristi se sljedećim pravilima:

- obje lokacije podobne i nedominirane, izbor osobnog najboljeg osobnog vodiča vrši se slučajnim odabirom
- obje lokacije podobne i dominirane, izbor osobnog najboljeg osobnog vodiča vrši se slučajnim odabirom
- jedna lokacija je podobna/dominirana, a druga lokacija je podobna/nedominirana - odabire se podobna/nedominirana lokacija za osobnog vodiča
- jedna lokacija je podobna, dok je druga lokacija nepodobna - odabire se podobna lokacija za osobnog vodiča
- obje lokacije su nepodobne - svakoj od lokacija se dodjeljuje iznos dobrote ograničenja cf te se odabire ona lokacija s boljom dobrotom, prema izrazu:

$$cf_i = \sum_{j=1}^{NC} \frac{(cv_j)_i}{\max cv_j} \quad (4.10)$$

gdje je:

i - i -ta lokacija

$j = 1 \dots NC$ - broj ograničenja

cf - iznos dobrote ograničenja

cv_j - narušenost ograničenja

$\max cv_j$ - maksimalna narušenost j -tog ograničenja s obzirom na narušenost ograničenja od svih lokacija.

Kao što se vidi izraz (4.10) vrednuje broj narušenih ograničenja kao i iznose narušenosti ograničenja. Također je bitno napomenuti da je normalizacija izvedena automatski bez potrebe za definiranjem normirajućih faktora prije optimizacije. S druge strane to je ujedno i nedostatak jer se normalizacija izvodi s trenutno postignutim maksimalnim prekršajima ograničenja što zahtjeva da se za svaku lokaciju u repozitoriju lokalnih i globalnih vodiča nakon svake iteracije iznova računaju dobrote ograničenja.

Odabir najboljeg globalnog vodiča zapravo je vrlo rijetko upravljan s izrazom za dobrotu ograničenja jer globalni vodič je skoro uvijek nedominirana podobna lokacija. Nepodobne lokacije mogu biti globalni vodiči samo u prvim iteracijama jako ograničenih problema, a tada se primjenjuje ekvivalentni skup odluka kao kod odabira lokalnih vodiča. Odabir

globalnog vodiča zapravo je u najvećoj mjeri i dalje upravljani odabranom metodom za rad s više ciljeva.

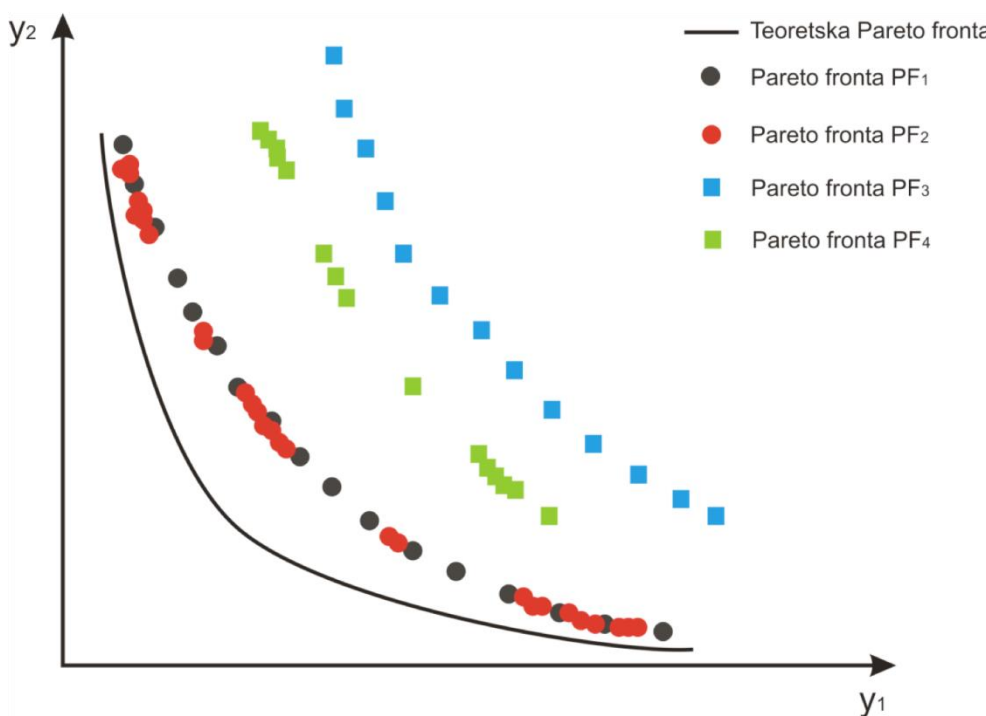
4.6. Mjerenje kvalitete Pareto fronte

Mjerenje kvalitete dobivene Pareto fronte, [14] i [15], a time i optimizacijskih algoritama, obavlja se u kontroliranim uvjetima. To znači da je prije provođenja mjerenja definirana računalna oprema na kojoj će se provoditi svi eksperimenti. Isto tako, utvrđena je standardna rezolucija (broj poziva modela), koju je potrebno držati konstantnom, unutar jednog ciklusa mjerenja. Potreba za kontroliranim uvjetima proizlazi iz želje za dosljednom kvantitativnom usporedbom rezultata MOEA (*Multi Objective Evolutionary Algorithm*) algoritama. Usporedba se može promatrati između rezultata dobivenih mjerenim algoritmom, ili između dobivenih rezultata i *benchmarka*, tj. referentnog problema s poznatim teorijskim ili približno teorijskim rješenjem. U slučaju ispitivanja MOEA algoritama *benchmark* je, tzv. optimalna Pareto fronta, PF_{true} . Idealno bi bilo da postoji teoretska Pareto fronta (Pareto fronta kontinuiranog matematičkog modela). Nažalost, u velikom broju slučajeva to nije slučaj, pa se kod realnih problema koristi najbolja dobivena Pareto Fronta nekim optimizacijskim algoritmom.

Kriteriji na osnovu kojih se uspoređuju optimizacijski algoritmi, a koji su dobiveni mjerenjem u kontroliranim uvjetima, mogu se svrstati u dvije kategorije, uspješnost i djelotvornost. Pod uspješnošću podrazumijeva se potreban računalni rad za dobivanje rješenja, tj. CPU (*central processing unit*) vrijeme, broj iteracija/evaluacija, upotreba računalnih resursa, skalabilnost (daje informaciju o veličini projektnog problema koji algoritam može riješiti) i lakoća korištenja (potreban napor da bi se svladala upotreba optimizacijskog algoritma, *user friendliness*). Dok djelotvornost podrazumijeva što bolje pretražen projektni prostor, a to znači ravnomjernije popunjenu Pareto frontu i što bolju aproksimaciju teoretske Pareto fronte.

Da bi se lakše predočio kompleksan kriterij, kao što je djelotvornost, na slici 9. prikazano je nekoliko Pareto fronti od kojih je jedna teoretska Pareto fronta. Usporedbom PF_4 i PF_3 potpuno je jasno da PF_4 dominira nad PF_3 , ali isto tako je vidljivo da je PF_3 ravnomjernije popunjena od PF_4 . PF_1 i PF_2 podjednako su blizu teoretske Pareto fronte, ali je PF_1 ipak bolja pošto je za razliku od PF_2 jednoliko popunjena. Cilj svakog optimizacijskog algoritma

je generiranje Pareto fronte PF_1 koja je: jednoliko popunjena, blizu teoretske Pareto fronte i u potpunosti razapeta između rubova atributnog prostora.



Slika 9. Kvaliteta Pareto fronte

Način na koji se postiže ravnomjerno popunjena Pareto fronta, što bolja aproksimacija Pareto fronte, itd., je generiranje jakog selekcijskog pritiska. Kod algoritama kao što je MOGA, selekcijski pritisak se generira pomoću operatora dodjele dobrote i operatorima selekcije.

Isto tako nije zanemariv ni aspekt efikasnosti optimizacijskog algoritma, posebno upotreba računalnih resursa, kao što su memorijski prostor i procesorsko opterećenje. Optimizacijski algoritam u svakoj iteraciji generira znatan broj novih nedominiranih rješenja koje je potrebno spremiti u memoriju računala. Pošto je memorijski prostor računala fizički limitiran, potrebno je ograničiti broj spremljenih nedominiranih rješenja. Isto tako, veliki broj nedominiranih rješenja uvelike opterećuje CPU računala, budući da se svako rješenje dobiveno u trenutnoj iteraciji mora usporediti s postojećim nedominiranim rješenjima. Upravo zbog toga svaki optimizacijski algoritam na svoj specifičan način u svakoj iteraciji određuje koja nedominirana rješenja čuva, a koja odbacuje.

4.7. Indikatori kvalitete ostvarene Pareto fronte

MOEA indikatori predstavljaju vrijednost dobivenu u odnosu na broj podobnih (odnosno, nedominiranih) rješenja, za blizinu Pareto fronti ili nekom drugom skupu projekata. Također, MOEA indikatori mogu biti realne vrijednosti koje označavaju neku od karakteristika PF_{true} - raširenost, ravnomjernu popunjenost, itd. Potrebno je uočiti da su neke od mjera jednostavne za izračunavanje i razumijevanje, dok je kod ostalih indikatora kvalitete potrebna normalizacija atributa (atributi imaju različite mjerne jedinice), kako bi se generirale usporedne vrijednosti.

Iz simbola definiranima u tablici 4. i iz slike 10. a), moguće je uspostaviti sljedeće odnose između rješenja:

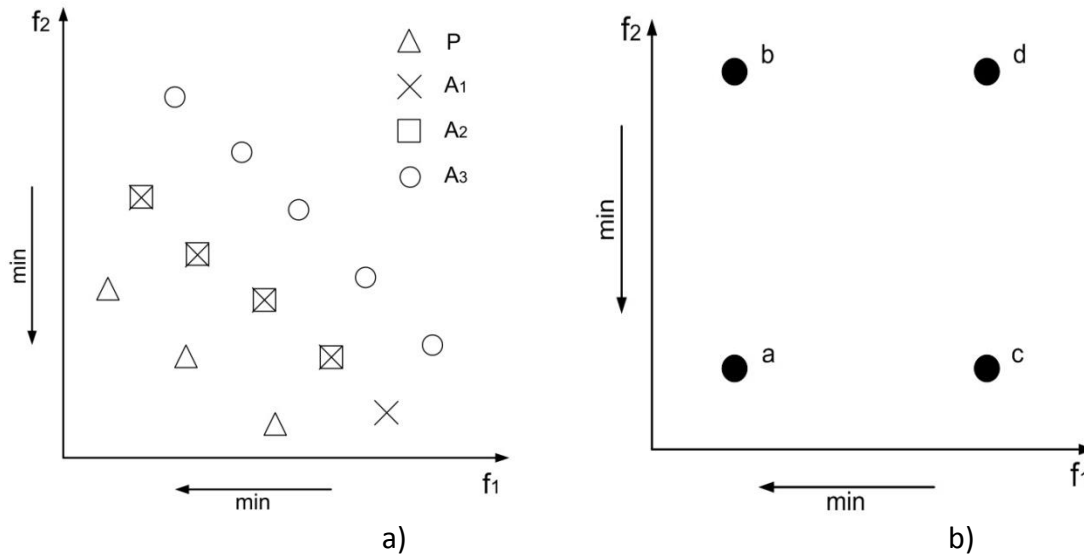
$$a \succ b, a \succ c, a \succ d, b \succ d, c \succ d, a \succ \succ d, a \succeq a, a \succeq b, a \succeq c, a \succeq d, b \succeq b, b \succeq d, c \succeq c, c \succeq d, d \succeq d, b || c.$$

Isto tako, prema simbolima definiranima u tablici 4. i slici 10. b), slijede odnosi dominiranosti između skupa rješenja za rezultate algoritama A_1 , A_2 i A_3 imajući PF_{true} od P :

$$A_1 \succ A_3, A_2 \succ A_3, A_1 \succ \succ A_3, A_1 \succeq A_1, A_1 \succeq A_2, A_1 \succeq A_3, A_2 \succeq A_2, A_3 \succeq A_3, A_1 \triangleright A_2, A_1 \triangleright A_3, A_2 \triangleright A_3.$$

Tablica 4. Odnos dominacije rješenja i skupa rješenja

Odnos	Rješenja	
Jaka dominiranost	$f(x^1) \succ \succ f(x^2)$	$\forall_{i \in F}, (f(x^1) \text{ je bolje od } f(x^2))$
Dominiranost	$f(x^1) \succ f(x^2)$	$f(x^1)$ nije lošiji od $f(x^2)$ u svim ciljevima i bolji je u jednom cilju
Slaba dominiranost	$f(x^1) \succeq f(x^2)$	$f(x^1)$ nije lošiji od $f(x^2)$ u svim ciljevima
Neusporediv	$f(x^1) f(x^2)$	niti $f(x^1)$ slabo dominira $f(x^2)$ niti $f(x^2)$ slabo dominira $f(x^1)$
Indiferentan	$f(x^1) \sim f(x^2)$	$f(x^1)$ ima istu vrijednost $f(x^2)$ u svakom cilju
	Skup rješenja	
Jaka dominiranost	$A \succ \succ B$	svaki $x^2 \in B$ je jako dominiran barem jednim $x^1 \in A$
Dominiranost	$A \succ B$	svaki $x^2 \in B$ je dominiran barem jednim $x^1 \in A$
Bolji	$A \triangleright B$	svaki $x^2 \in B$ je slabo dominiran barem jednim $x^1 \in A$ $A \neq B$
Slaba dominiranost	$A \succeq B$	svaki $x^2 \in B$ je slabo dominiran barem jednim $x^1 \in A$
Neusporediv	$A B$	niti A slabo dominira B ni B slabo dominira A
Indiferentan	$A \sim B$	A slabo dominira B i B slabo dominira A



Slika 10. Grafički prikaz odnosa dominiranosti kod minimuma za rješenja i skupove rješenja

Slijedi opis indikatora kvalitete:

- Vrijeme trajanja optimizacijskog procesa (CalcTime) - ovo je jednostavan indikator kvalitete koji računa ukupno vrijeme optimizacijskog procesa.
- Broj poziva analitičkog modela (NumModelCalls) - indikator kvalitete koji pokazuje broj poziva analitičkog modela.
- Broj podobnih rješenja (NumFeasible) - indikator kvalitete koji daje broj podobnih rješenja tijekom cijelog postupka optimizacije.
- Ukupni broj nedominiranih rješenja (ONVG, Overall Nondominated Vector Generation Ratio) - indikator kvalitete koja mjeri ukupan broj nedominiranih rješenja.
- Najbolji projekt (Best Objective) - najbolji projekt vraća najbolji projekt po zadanom cilju.
- Normalizirana raširenost Pareto fronte - ovaj indikator kvalitete (Pareto Front Normalized Span) mjeri raširenost Pareto fronte, a izražava se:

$$pfSpan = \frac{\sum_{i=1}^n |max_i - min_i|}{n} \quad (4.11)$$

gdje su:

n - broj atributa

max_i - najveća pronađena vrijednosti atributa

min_i - najmanja pronađena vrijednosti atributa

- Vanjski promjer - Vanjski promjer indikator kvalitete mjeri udaljenost trenutnog rješenja od NADIR rješenja (najgore rješenje, suprotno od utopije). Ovim indikatorom moguće je vidjeti pomicanje Pareto fronte kroz iteracije algoritma i njeno približavanje svom maksimumu.
- Srednja NADIR udaljenost - Srednja NADIR udaljenost (Average NADIR Distance) je indikator kvalitete koji pokazuje ispunjenost Pareto fronte, odnosno srednju vrijednost udaljenosti od NADIR-a.
- Omjer vanjskog promjera - Ovaj indikator kvalitete (Outer Diameter Ratio) mjeri odnos dvaju prije navedenih indikatora kvalitete:

$$NODR = \frac{\text{Srednja NADIR udaljenost}}{\text{Vanjski promjer}} \quad (4.12)$$

- Raspršenost - Indikator kvalitete koji daje mjeru popunjenosti PFknown (Pareto fronte koja se mjeri). Izražava se preko srednje udaljenosti između susjednih rješenja, te ukoliko mu je vrijednost nula radi se o slučaju kada su sva rješenja međusobno jednako udaljena.
- Najveća greška Pareto Fronte (ME, Maximum Pareto Front error) - indikator kvalitete koji mjeri udaljenost dobivene Pareto fronte od referentne Pareto fronte. Ukoliko mu je vrijednost nula radi se o slučaju kada se poklapaju dobivena i referentna Pareto fronta.
- Epsilon indikator (I_ϵ) - Epsilon indikator kvantitativno definira za koliko je jedan skup rješenja lošiji od drugog, u odnosu na sve ciljeve.

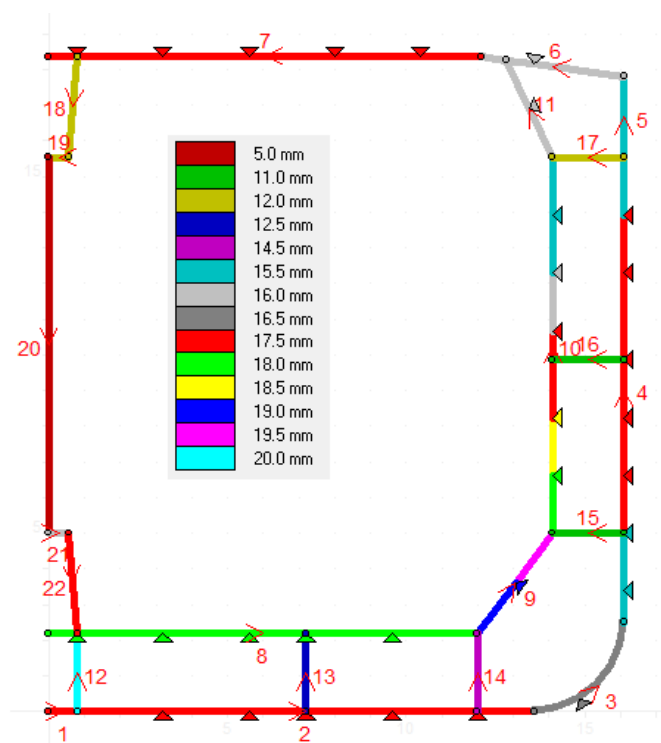
5. Projektiranje glavnog rebra tankera

5.1. MARS model

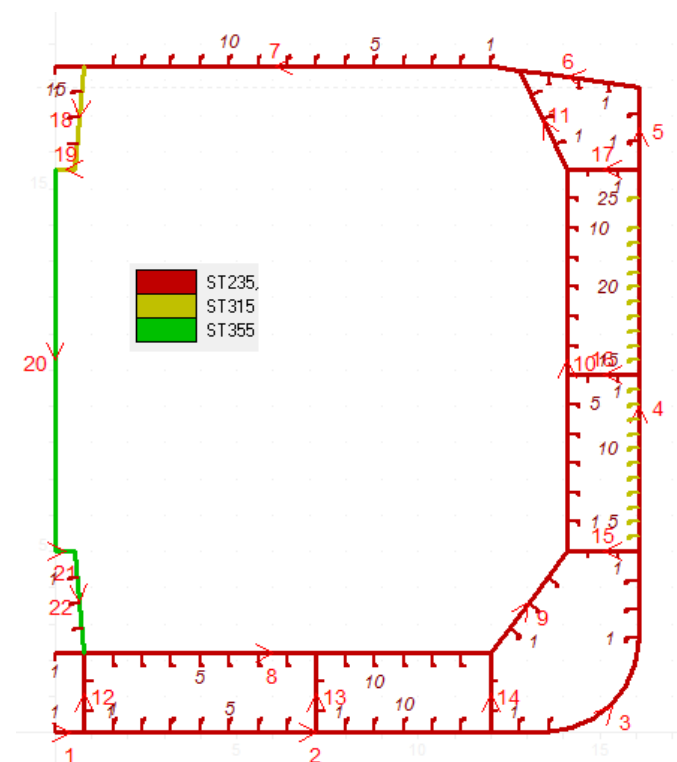
Glavno rebro tankera je modelirano u računalnom programu MARS kojega je izradilo klasifikacijsko društvo Bureau Veritas u svrhu pojednostavljenja proračuna minimalnih dimenzija kojega je propisao IACS [1]. Na slikama 11., 12. i 13. su redom prikazani: debljina limova, vrste i razmještaj materijala glavnog rebra, te razmještaj i dimenzije uzdužnjaka

Cilj proračuna bio je određivanje uzdužnih strukturnih dimenzija elementa presjeka rebra tankera. Proračunate dimenzije sa korozijskim dodatkom korištene su za modeliranje modela u programu MAESTRO.

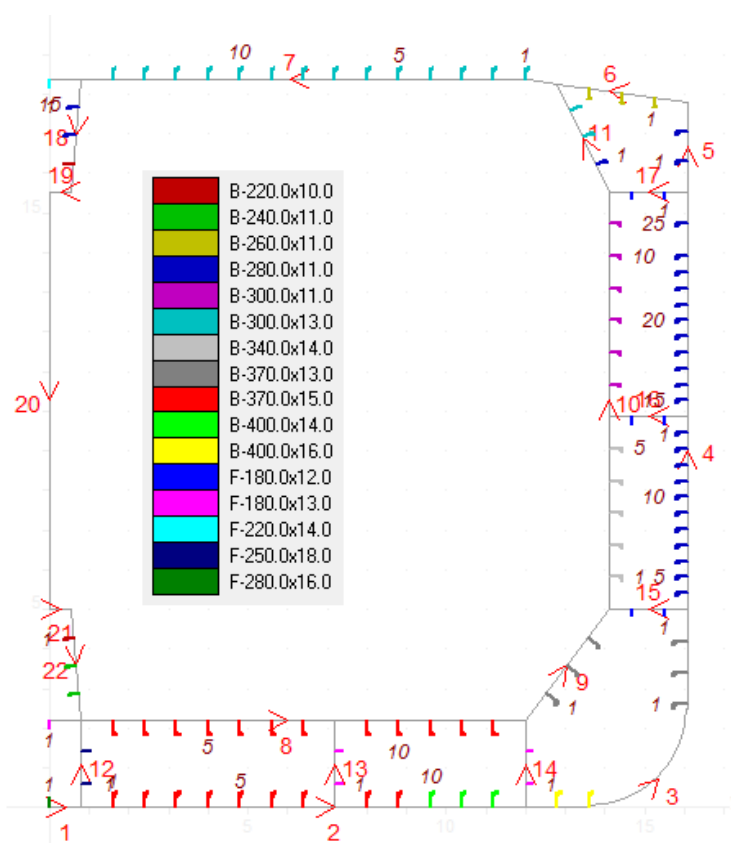
Program MARS za analizirane modele daje podatke o njihovoj uzdužnoj graničnoj čvrstoći, odnosno o graničnom momentu savijanja konstrukcije. Osim graničnog momenta savijanja računa i zahtjevani moment savijanja. U proračunu uzima u obzir korekcijske faktore sigurnosti. Osim što globalno ispituje čvrstoću konstrukcije, ispituje ju i lokalno. Na temelju lokalnih i globalnih kriterija, program računa gross i net debljine strukturnih elemenata. Njihova razlika je korozijski dodatak koji je definiran Harmoniziranim pravilima.



Slika 11. Pregled debljina oplata



Slika 12. Pregled vrsta materijala



Slika 13. Pregled uzdužnjaka

Tablica 5. Granični i zahtjevani momenti savijanja trupa broda proračunati u programu MARS

Prototip		M_U [kNm]	M_D [kNm]	Faktor podobnosti
neoštećeni	pregib	5333201	3163477	0.2554
	progib	-4378642	-3472115	0.1155
oštećenje boka	pregib	4951521	2392983	0.3484
	progib	-3755837	-2349275	0.2304
oštećenje dna	pregib	4368136	2392983	0.2921
	progib	-3903924	-2349275	0.2486

Treba naglasiti kako MARS za slučaj progiba izračunava dvije vrijednosti za zahtijevani moment savijanja, momenti za Navigation, odnosno u uvjetima službe, te za Full Load Homogeneous, odnosno za puno opterećenje. Od dvije ponuđene vrijednosti birala se ona koja je po apsolutnoj vrijednosti veća. Time se osigurao u daljnjim razmatranjima da ako se zadovolji onaj po apsolutnoj vrijednosti veći moment, da će biti zadovoljen i onaj koji je po apsolutnoj vrijednosti manji.

5.1.1. Rezultati proračuna u programu MARS

U tablici 6. su prikazane debljine oploćenja na način da su prikazane net i gross dimenzije za model modeliran u programu MARS. Za minimalnu net debljinu se prema pravilima uzimala najveća izračunata debljina od tri izračunate prema Pravilima IACS, prema kojima se definiraju debljine prema Load, Test ili Minimum Thickness kriterijima.

U tablici 7. prikazane su dimenzije uzdužnjaka za net i gross dimenzije modela prema IACS propisima.

Kao razlika gross i net dimenzija dobivena je debljina korozijskog dodatka. Granični momenti savijanja, koji su izračunati za slučaj pregiba i slučaj progiba, pomoću programa MARS računati su za gross dimenzije umanjene za pola korozijskog dodatka. Prema tim dimenzijama modelirani su modeli u programu MAESTRO, kako bi radi provjere rezultati za granične momente savijanja izračunati pomoću modula LUSA bili usporedivi s rezultatima izračunatima pomoću programa MARS.

Tablica 6. Rezultati proračuna minimalnih dimenzija oploćenja

Model CRS_H Broj Područje	Kriterij	Gross debljina [mm]		Net debljina [mm]		Korozijski dodatak [mm]	Odbitak za koroziju [mm]	Gross debljina [mm] LUSA model
		Model	Pravila	Model	Pravila			
1 keel	Mini thick.	17.5	15.5	15	13	2.5	1.25	16.25
2 bottom shell	Load thick. Test thick.	17.5	16.5	15	13.5	3	1.5	16
3 bilge	Load thick.	16.5	14.5	13.5	11.5	3	1.5	15
4 side shell	Load thick. Test thick.	15.5	15.5	12.5	12.5	3	1.5	14
5 side shell	Mini thick.	17.5	15	14.5	12	3	1.5	16
6 side shell	Mini thick.	17.5	15.5	14	12	3.5	1.75	15.75
7 side shell	Mini thick.	17.5	15	13.5	11	4	2	15.5
8 side shell	Mini thick.	15.5	15	12	11.5	3.5	1.75	13.75
9 side shell	Mini thick.	15.5	15.5	12	12	3.5	1.75	13.75
10 deck	Mini thick.	16	13.5	12	9.5	4	2	14
11 deck	Mini thick.	17.5	13	13.5	9	4	2	15.5
12 inner bottom	Mini thick.	18	13.5	15.5	11	2.5	1.25	16.75
13 inner bottom	Load thick.	18	18	14	14	4	2	16
14 hopper side	Load thick.	19	19	16	16	3	1.5	17.5
15 hopper side	Load thick.	19.5	18.5	16.5	15.5	3	1.5	18
16 inner hull	Load thick.	18	17	15	14	3	1.5	16.5
17 inner hull	Load thick.	18.5	16.5	15.5	13.5	3	1.5	17
18 inner hull	Load thick.	17.5	15.5	14.5	12.5	3	1.5	16
19 inner hull	Load thick.	16	14.5	13	11.5	3	1.5	14.5
20 inner hull	Load thick.	15.5	14	12.5	11	3	1.5	14
21 inner hull	Load thick.	15.5	13	11.5	9	4	2	13.5
22 inner hull	Load thick. Mini thick.	16	13	12	9	4	2	14
23 double bottom girder I	Load thick.	20	15.5	17	12.5	3	1.5	18.5
24 double bottom girder II	Mini thick.	12.5	12	9.5	9	3	1.5	11
25 double bottom girder III	Mini thick.	14.5	12	11.5	9	3	1.5	13
26 stringer I	Mini thick.	11	11	8	8	3	1.5	9.5
27 stringer II	Mini thick.	11	11	8	8	3	1.5	9.5
28 stringer III	Mini thick.	12	13	8	9	4	2	10
29 upper bulkhead stool	Mini thick.	12	12.5	8.5	9	3.5	1.75	10.25
30 lower bulkhead stool	Mini thick.	16	10.5	13.5	8	2.5	1.25	14.75
31 lower bulkhead stool	Load thick.	17.5	12	15	9.5	2.5	1.25	16.25

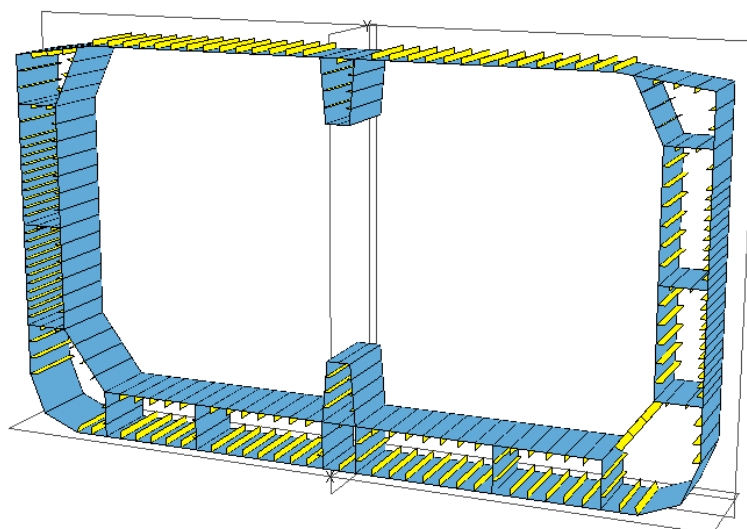
Tablica 7. Rezultati proračuna minimalnih dimenzija profila

			Ekvivalentni T-profil					Korозиjski	Odbitak za	Gross debljina [mm]	
Model CRS-H			Gross t _w [mm]		Net t _w [mm]		Gross	dodatak	koroziju	LUSA model	
Broj	Područje	Profil	Model	Pravila	Model	Pravila	t _f [mm]	[mm]	[mm]	tw	t _f
1	keel	F 280x16	16	15	13.5	12.5		2.5	1.25	14.75	
2	bottom shell	HP 370x15	15	11	12	8	38.22	3	1.5	13.5	36.72
3	bottom shell	HP 400x14	14	12	11	9	41.48	3	1.5	12.5	39.98
4	bottom shell	HP 400x16	16	12	13	9	41.48	3	1.5	14.5	39.98
5	outer side shell	HP 370x13	13	11	10	8	38.22	3	1.5	11.5	36.72
6	outer side shell	HP 280x11	11	10	8	7	28.43	3	1.5	9.5	26.93
7	deck (wing)	HP 260x11	11	10.5	7	6.5	26.26	4	2	9	24.26
8	deck	HP 300x13	13	9	10.5	6.5	30.61	2.5	1.25	11.75	29.36
9	inner bottom	HP 370x15	15	11	12	8	38.22	3	1.5	13.5	36.72
10	inner hopper	HP 370x13	13	11	10	8	38.22	3	1.5	11.5	36.72
11	inner side shell	HP 340x14	14	10.5	11	7.5	34.96	3	1.5	12.5	33.46
12	inner side shell	HP 300x11	11	9.5	8	6.5	30.61	3	1.5	9.5	29.11
13	inner side shell	HP 300x11	11	10.5	7	6.5	30.61	4	2	9	28.61
14	inner side shell	HP 300x11	11	11	7	7	30.61	4	2	9	28.61
15	inner wing	HP 280x11	11	10.5	7	6.5	28.43	4	2	9	26.43
16	inner wing	HP 300x13	13	10.5	9	6.5	30.61	4	2	11	28.61
17	deck (stool)	F 220x14	14	12.5	11.5	10		2.5	1.25	12.75	
18	upper stool	HP280x11	11	9	8.5	6.5	28.43	2.5	1.25	9.75	27.18
19	upper stool	HP 220x10	10	9	7.5	6.5	21.91	2.5	1.25	8.75	20.66
20	lower stool	HP 220x10	10	9	7.5	6.5	21.91	2.5	1.25	8.75	20.66
21	lower stool	HP240x11	11	9	8.5	6.5	24.09	2.5	1.25	9.75	22.84
22	inner bottom (stool)	F 180x13	13	10.5	10.5	8		2.5	1.25	11.75	
23	girder 1	F 250x18	18	16	15	13		3	1.5	16.5	
24	girder 2	F 180x13	13	11	10	8		3	1.5	11.5	
25	girder 3	F 180x13	13	11	10	8		3	1.5	11.5	
26	stringer 1	F 180x12	12	11	9	8		3	1.5	10.5	
27	stringer 2	F 180x12	12	11	9	8		3	1.5	10.5	
28	stringer 3	F 180x12	12	12	8	8		4	2	10	

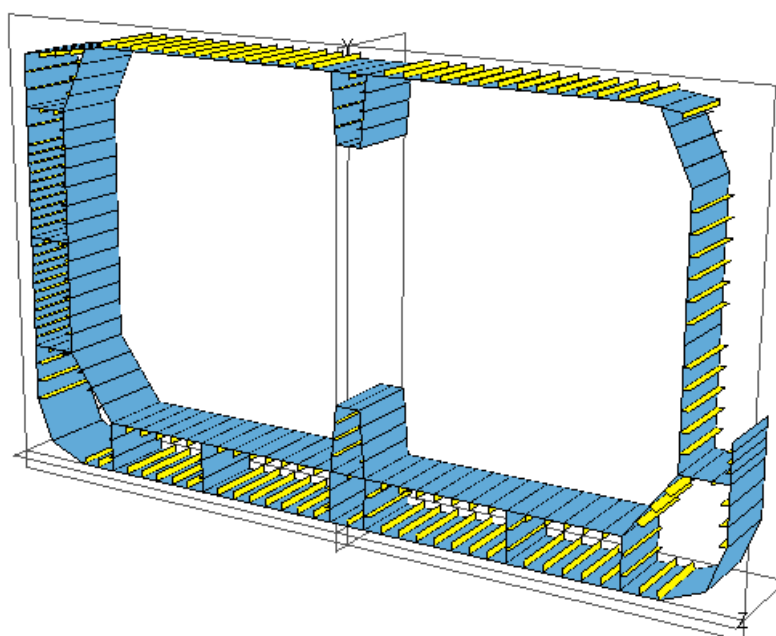
5.2. LUSA model

Modul LUSA za analizirane modele daje podatak o njihovoj uzdužnoj graničnoj čvrstoći. Pri proračunu uzdužnog momenta savijanja, sam modul ne uzima u obzir korekcijski faktor sigurnosti koji se zahtjeva prema Harmoniziranim pravilima. Također, modul ne računa korозиjske dodatke.

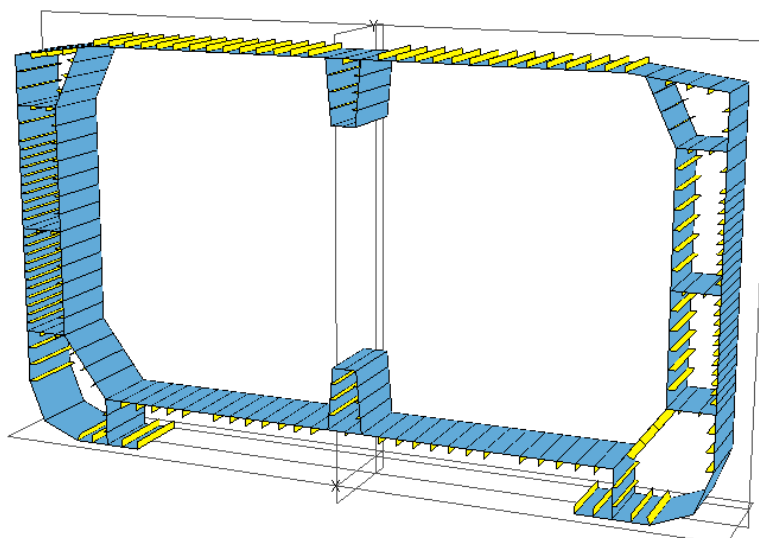
Prema dimenzijama određenih pomoću programa MARS koje su umanjene za pola korозиjskog dodatka modelirani su modeli u programu MAESTRO. Izrađeni su modeli za neoštećeni presjek glavnog rebra, te modeli glavnog rebra sa oštećenjem boka, te oštećenjem dna. Modeli su redom prikazani na slikama 14., 15. i 16. Oštećenja su zadana prema Harmoniziranim Pravilima, te su dimenzije oštećenja prikazane u tablicama 6. i 7.



Slika 14. MAESTRO model glavnog rebra



Slika 15. MAESTRO model glavnog rebra s oštećenjem boka



Slika 16. MAESTRO model glavnog rebra s oštećenjem dna

Pripremljene modele koristi se za pokretanje rješavanja optimizacijskog problema. Uz model pripremljen u programu MAESTRO, bilo je potrebno pripremiti ulazne podatke za debljine opločenja i za bulb profile.

5.3. Usporedba rezultata – MARS2000 i LUSA

U tablici 8. prikazane su vrijednosti momenata savijanja broskog trupa proračunatih pomoću programa MARS prema IACS CSR-H, te pomoću modula LUSA. Odnos graničnog momenta savijanja za slučaj progiba, odnosno pregiba, i zahtjevanog momenta savijanja prikazan je preko faktora podobnosti.

Tablica 8. Usporedba momenata savijanja izračunatih pomoću programa MARS i modula LUSA

Prototip		M_U [kNm]		$(M_{UM}-M_{UL})/M_{UM}$	M_D [kNm]	Faktor podobnosti	
		MARS- M_{UM}	LUSA- M_{UL}			MARS	LUSA
neoštećeni	pregib	5333201	5113100	4.13%	3163477	0.2554	0.2356
	progib	-4378642	-4179120	4.56%	-3472115	0.1155	0.0924
oštećenje boka	pregib	4951521	4651050	6.07%	2392983	0.3484	0.3206
	progib	-3755837	-3504210	6.70%	-2349275	0.2304	0.1973
oštećenje dna	pregib	4368136	3977200	8.95%	2392983	0.2921	0.2487
	progib	-3903924	-3672500	5.93%	-2349275	0.2486	0.2197

Tablica 9. Odabir modela sa oštećenim bokom za daljnju analizu

		M_U [kNm]			$(M_{UM}-M_{UL})/M_{UM}$	M_D	Faktor podobnosti		
		MARS- M_{UM}	LUSA- M_{UL}	M_{UL}/γ_R			MARS	LUSA	LUSA(γ_R)
oštećenje boka (prvi slučaj)	pregib	4864881	4211100	3828273	13.44%	2392983	0.3406	0.2753	0.2307
	progib	-3640209	-3112300	-2829364	14.50%	-2349275	0.2155	0.1397	0.0927
oštećenje boka (drugi slučaj)	pregib	4951521	4651050	4228227	6.07%	2392983	0.3484	0.3206	0.2772
	progib	-3755837	-3504210	-3185645	6.70%	-2349275	0.2304	0.1973	0.1511

Širina dvoboka modela iznosi 2000 mm, a dubina prodiranja oštećenja izračunata prema točki 2.1. Proračun uzdužne čvrstoće broda u oštećenom stanju, iznosi 2012.5 mm. Najprije je izrađen model kojem je bok bio u potpunosti probijen. Analizom graničnih momenata pomoću programa MARS, te zatim pomoću modula LUSA, utvrđena su velika odstupanja u rezultatima. Zbog tih odstupanja izrađen je novi model sa oštećenim dvobokom, ali je ovaj put oštećenje prodiralo točno do unutarnjeg oploćenja. Rezultati ovog modela izračunati u programu MARS, te pomoću modula LUSA davali su puno manja odstupanja izračunatih vrijednosti graničnih momenata savijanja. Dalje u radu promatran je model sa manjim razlikama rezultata izračunatih pomoću programa MARS, odnosno modula LUSA.

5.4. Optimizacija glavnog rebra tankera

Optimizacijski problem definiran je pomoću varijabli, atributa i ograničenja. U ovom radu zadatak je bio pronaći projekt koji će najbolje zadovoljavati ciljeve minimizacije mase i maksimizacije faktora podobnosti za slučaj progiba. Cilj vezan uz maksimizaciju faktora podobnosti za slučaj progiba odabran je analizom predhodnih rezultata za granične momente savijanja trupa broda kojom je utvrđeno da je upravo taj slučaj kritičan, te ako se zadovolje zahtjevi za graničnim momentom u tom slučaju, može se pretpostaviti da će biti zadovoljeni i granični momenti ostalih slučajeva. Odnosno, za neoštećeni model da će biti zadovoljen zahtjev za graničnu čvrstoću u pregibu, te za oštećene modele zahtjev za graničnu čvrstoću u progibu i pregibu. Ovakvom pretpostavkom skraćeno je vrijeme optimizacije na jednu trećinu vremena koje bi bilo inače potrebno da su kao ciljevi bili zadani svi parametri podobnosti, odnosno, da su osim zadanog, bili još zadani kao ciljevi faktori podobnosti za slučaj progiba kod oštećenih modela. Nakon optimizacije izračunati su granični momenti za oštećene modele kako bi se potvrdilo da je zadovoljena gore navedena pretpostavka.

5.4.1. Definicija optimizacijskog problema

Kako bi pristupili rješavanju optimizacijskog problema pomoću programa DeMak potrebna je posebna priprema podataka. Ti podaci su u ovom radu obuhvaćali pripremu pomoću programa MARS i programa MAESTRO, odnosno modula LUSA. Pomoću programa MARS proračunate su dimenzije oploćenja, dimenzije i momenti otpora presjeka bulb profila, proračunati su granični i zahtjevani momenti savijanja trupa, te su određeni korozijski dodaci prema pravilima propisanim u Harmoniziranim Pravilima. U programu MAESTRO modeliran je model glavnog rebra tankera, te je pomoću modula LUSA izvršen proračun graničnih momenta savijanja trupa, te je ujedno izvršena i provjera rezultata. S obzirom da se za model u modulu LUSA ne računa korozijski odbitak automatski, bilo je potrebno od gross debljina proračunatih pomoću programa MARS oduzeti polovicu korozijskog dodatka i sa tim debljinama modelirati model koji se ispitivao pomoću modula LUSA.

Za početak rada potrebno je kreirati novi DeMak Problem. DeMak Problem obuhvaća sve zadatke koje projektant treba obaviti tijekom projektiranja određenog inženjerskog sustava. Nakon kreiranja novog problema učitava se model. Model je pripremljen u programu MAESTRO, te služi kao ulaz za pokretanje optimizacije u programu DeMak. Nakon što je model učitao, DeMak automatski prepoznaje varijable, attribute i ograničenja koja su već uključena u samom modelu. Sve karakteristike modela mogu se vidjeti i kontrolirati, odnosno, može se vidjeti opseg optimizacijskog problema, odnosno, koliko je uključenih varijabli, ograničenja i atributa. Također, moguć je odabir optimizacijskog algoritma. Na slici 17. prikazana je kontrolna ploča na kojoj su vidljivi podaci analiza, optimizacije i podproblema. Zadani model je neoštećeni model. Naknadno se vršio proračun za model sa oštećenim dnom i model sa oštećenim bokom. Te proračune se radilo zbog provjere rezultata sa predhodno proračunatim vrijednostima za prototipni model, odnosno zadovoljavanja granične uzdužne čvrstoće prema Harmoniziranim pravilima. O oštećenim modelima biti će naknadno, u točki 5.4.6. Rješenja optimizacijskog problema, prikazani rezultati za momente savijanja, te Pareto fronte prikazane u ovisnosti o atributima: masi, graničnom momentu savijanja, te faktora podobnosti za slučaj progiba.

The screenshot displays the Optimization SubProblem control panel. On the left, the Analysis Model Browser lists various components under 'opt2_all', including ModelControl, ModelGlobOutput, ModelMass_CG, LUSAout, ST235, bilge.P1, bottom.P1, bottom.S3, bottom.S1, bottom.S2, dbgirder.P3, dbgirder.P2, dbgirder.P1, dbstool.S1, deck.P3, deck.P1, deck.S3, deck.S1, deck.S2, dsdtringer.P1, dsstringer.P3, dsstringer.P2, girder.S3, girder.S1, girder.S2, inbottom.P1, and inbottom.P2. On the right, the Optimization SubProblem details are shown for 'AiO_1'. The details include General information (Name: AiO_1, Description, Exclude from sequence: False), Design Variables (Num Variables: 57, Variables List: (Collection)), Attributes (Num Attributes: 10, Attributes List: (Collection)), Constraints (Num Constraints: 9, Constraints List: (Collection)), Simulation Sequence (Num System Run objects: 1, Simulation Sequence: (...), Ship ModelControl: LUSA Sagg/Hogg), Optimizer (Optimizer Control: (...), Select Optimizer: MOPSO), Drag & Drop (Component Type: DesVarCont), and Output (Output designs: (...)). At the bottom, the Subproblem List table shows the following data:

ID	Name	Variables	Parameters	Attributes	Constraints	Optimiser	NDOM
e...	AiO_1	57		10	9	MOPSO_HC	

Buttons for 'Create' and 'Remove' are located to the right of the table.

Slika 17. Optimizacijska kontrolna ploča

Vidljivo je na slici 17. da je definirano 57 varijabli, 9 ograničenja, te 10 atributa. Na idućoj slici je pregled karakteristika problema, slika 18.

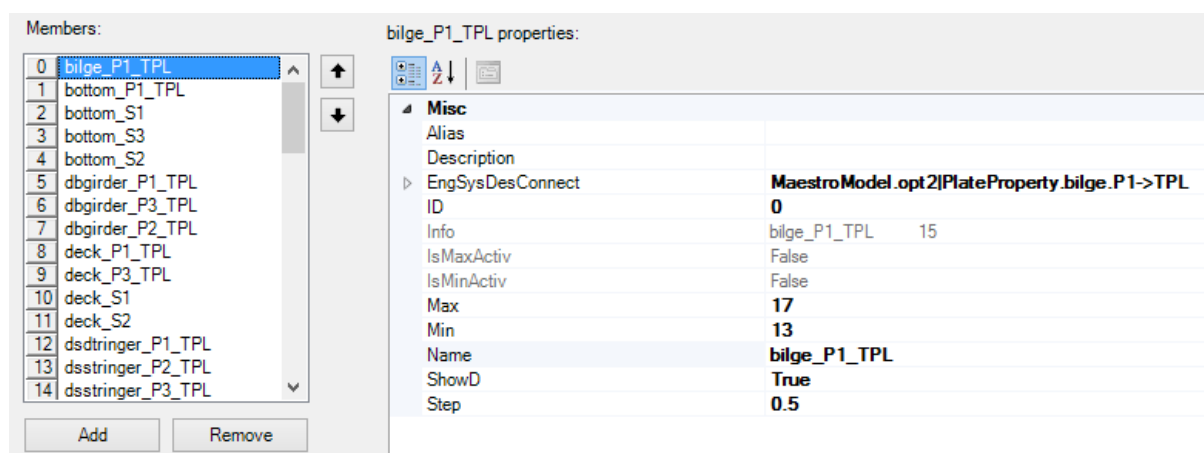
Optimization SubProblem	
▲ General	
Name	AIO_1
Description	
Exclude from sequence	False
▸ Details	(...)
▲ Design Variables	
Num Variables	57
Variables List	(Collection)
▲ Attributes	
Num Attributes	10
Attributes List	(Collection)
▲ Constraints	
Num Constraints	9
Constraints List	(Collection)
▲ Simulation Sequence	
Num System Run objects	1
▸ Simulation Sequence	(...)
Ship ModelControl	LUSA Sagg/Hogg
▲ Optimizer	
▸ Optimizer Control	(...)
Select Optimizer	MOPSO
▲ Drag & Drop	
Component Type	DesVarCont
▲ Output	
▸ Output designs	(...)

Slika 18. Pregled karakteristika optimizacijskog problema

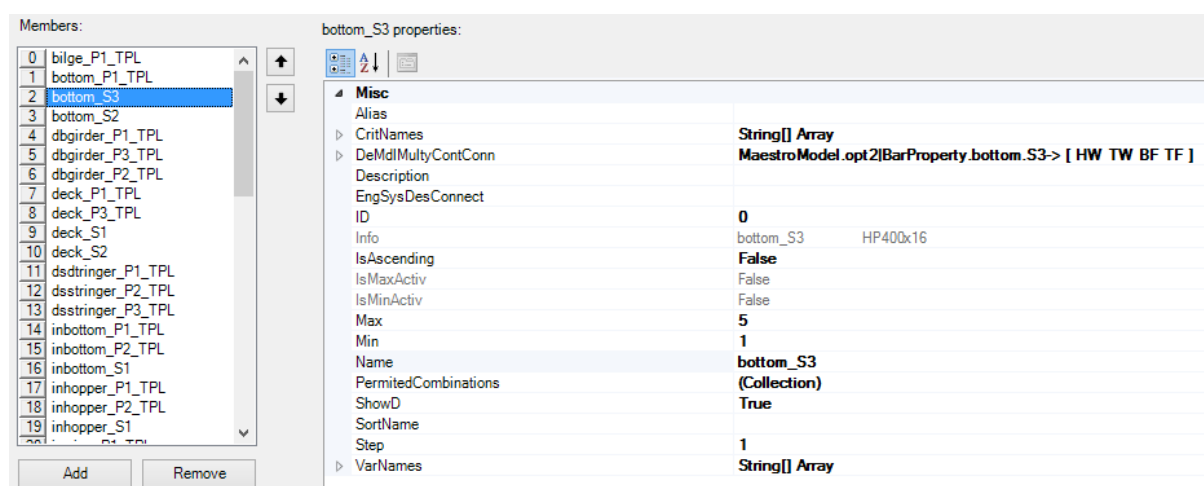
5.4.2. Variable

Varijable su definirane kao dimenzije uzdužno usmjerenih strukturnih elementa, odnosno elemenata koji sudjeluju u uzdužnoj čvrstoći broskog trupa. Dimenzije koje su korištene kao varijable bile su debljine za oploćenja, a za bulb profile varijable su definirane pomoću ekvivalentnih T-profila, odnosno preko debljine i visine struka, te deblje i širine prirubnice.

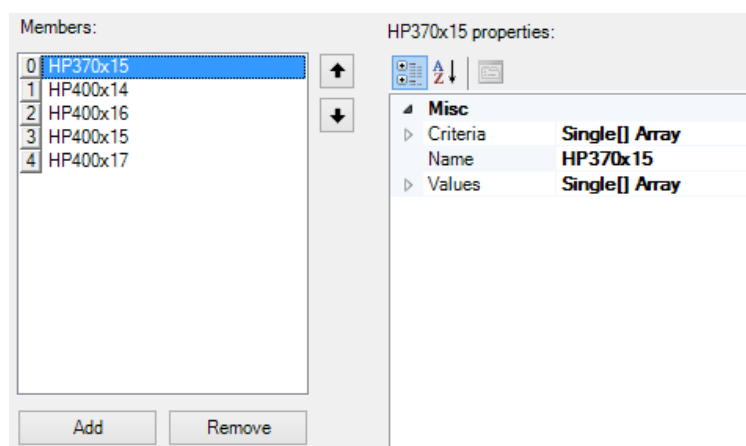
Kod definiranja debljina oploćenja definirane su minimalna i maksimalna debljina, te korak s kojim će se tražiti optimalana debljina, a u radu je uzet korak 0.5. Minimalne debljine proračunate su prema IACS CSR-H pravilima pomoću programa MARS. Kod ekvivalentnih T-profila definirana je grupa ekvivalentnih T-profila koja obuhvaća od minimalnih do maksimalnih profila za svako područje. Pri tome, su sve dimenzije jednog uzdužnjaka tretirane kao jedna kompleksna diskretna varijabla, gdje je vrijednost varijable s kojom upravlja optimizacijski algoritam redni broj dozvoljenog profila. Na osnovu odabranog profila, automatski se odabiru i dimenzije struka i pojasa koje ulaze daljnji proračun. Na slikama su prikazani primjeri definiranih varijabli, redom, na slici 19. za debljine oploćenja, a zatim na slici 20. za ekvivalentne T-profile. Slika 21. prikazuje primjer odabranih profila, od minimalnog do maksimalnog, koji pripadaju pojedinoj varijabli.



Slika 19. Primjer definirane varijable-debljina oploćenja

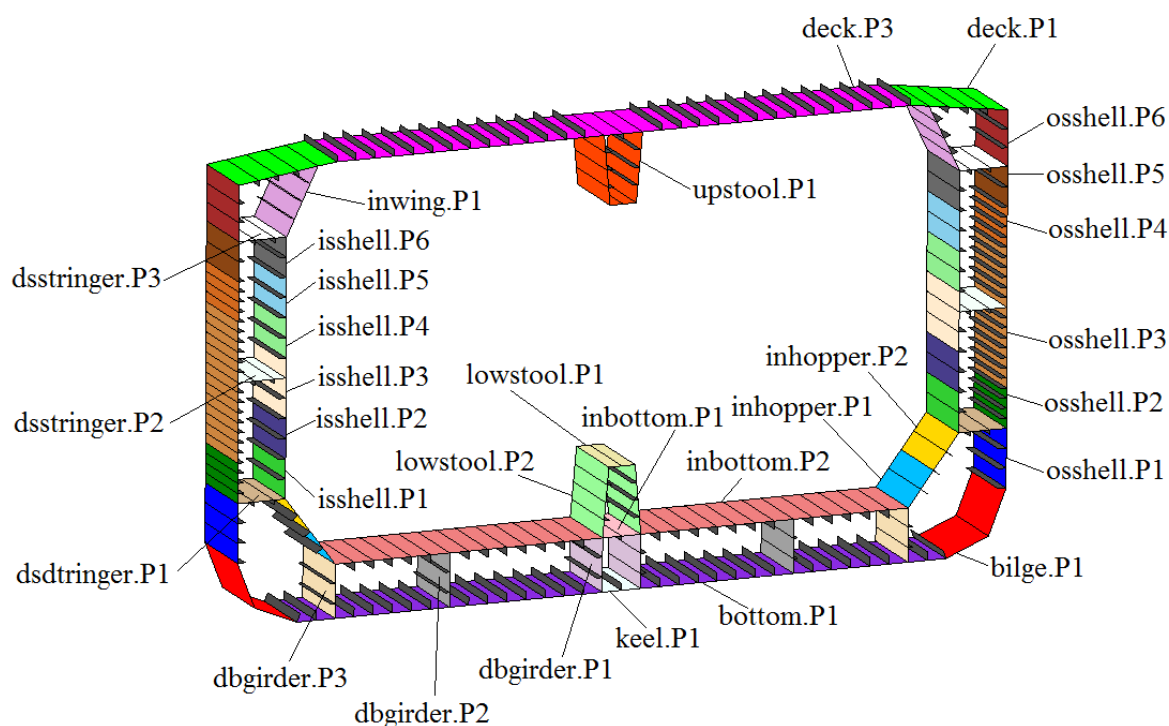


Slika 20. Primjer definirane varijable-ekvivalentni T-profil

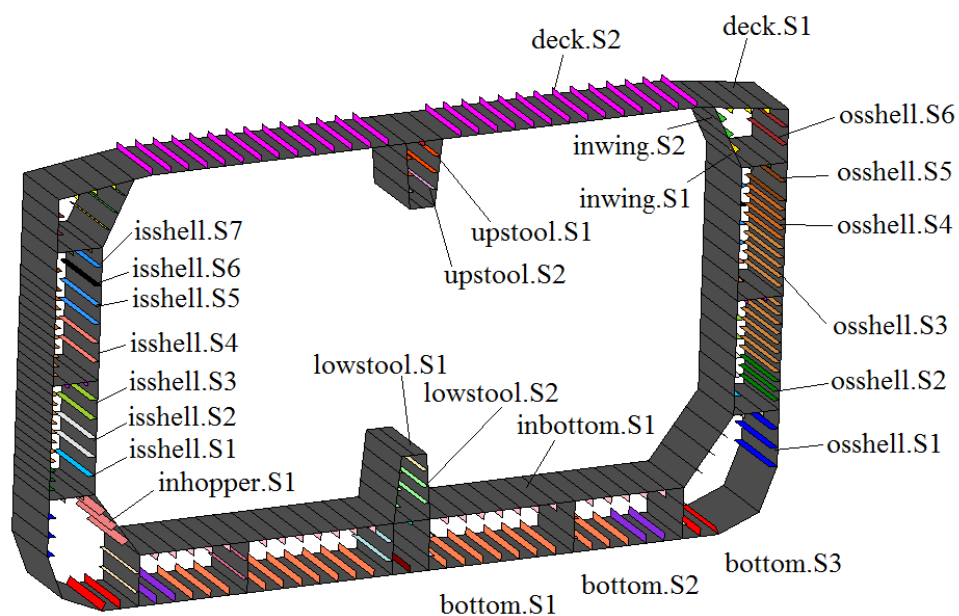


Slika 21. Primjer definiranih dozvoljenih profila unutar odabrane varijable ekvivalentnog T-profila

Na slikama 22. i 23. prikazane su su pozicije zadanih karakteristika debljina i profila koji su korišteni kao varijable u zadanom optimizacijskom problemu.



Slika 22. Položaji zadanih karakteristika debljina oplo;enja na modelu



Slika 23. Položaji zadanih karakteristika profila na modelu

U tablicama 10. i 11. prikazane su vrijednosti zadanih karakteristika prikazanih na predhodnim slikama, te minimalne i maksimalne vrijednosti za svaku karakteristiku unutar kojih se tražilo optimalno rješenje.

Tablica 10. Pregled zadanih karakteristika za debljine oploćenja

Karakteristika	Debljine LUSA model [mm]			Gross debljine [mm]		
	Minimum	Maksimum	Prototip	Minimum	Maksimum	Prototip
keel.P1	14.25	18.25	16.25	15.5	19.5	17.5
bottom.P1	15	18	16	16.5	19.5	17.5
bilge.P1	13	17	15	14.5	18.5	16.5
osshell.P1	14	16	14	15.5	17.5	15.5
osshell.P2	13.5	18	16	15	19.5	17.5
osshell.P3	13.75	17.75	15.75	15.5	19.5	17.5
osshell.P4	13	17.5	15.5	15	19.5	17.5
osshell.P5	13.25	17.75	13.75	15	19.5	15.5
osshell.P6	13.75	15.75	13.75	15.5	17.5	15.5
deck.P1	11.5	16	14	13.5	18	16
deck.P3	11	19.5	15.5	13	21.5	17.5
inbottom.P1	12.25	18.75	16.75	13.5	20	18
inbottom.P2	16	18	16	18	20	18
inhopper.P1	17.5	19.5	17.5	19	21	19
inhopper.P2	17	20	18	18.5	21.5	19.5
isshell.P1	15.5	18.5	16.5	17	20	18
isshell.P2	15	19	17	16.5	20.5	18.5
isshell.P3	14	18	16	15.5	19.5	17.5
isshell.P4	13	16.5	14.5	14.5	18	16
isshell.P5	12.5	16	14	14	17.5	15.5
isshell.P6	11	15.5	13.5	13	17.5	15.5
inwing.P1	11	16	14	13	18	16
dbgirder.P1	14	20.5	18.5	15.5	22	20
dbgirder.P2	10.5	13	11	12	14.5	12.5
dbgirder.P3	10.5	15	13	12	16.5	14.5
dsdtringer.P1	9.5	11.5	9.5	11	13	11
dsstringer.P2	9.5	11.5	9.5	11	13	11
dsstringer.P3	11	15	10	13	17	12
upstool.P1	10.75	14.25	10.25	12.5	16	12
lowstool.P1	9.25	16.75	14.75	10.5	18	16
lowstool.P2	10.75	18.25	16.25	12	19.5	17.5

U tablici 11. pojavljuju se h_w i t_w koju predstavljaju net visinu i debljinu bulb profila. Za analizu pomoću modula LUSA potrebno je bilo odrediti ekvivalentne T profile i od njegovih debljina oduzeti pola korozijskog dodatka koji je bio određen pomoću programa MARS.

Ekvivalentni T profili definirani su visinom struka h_w , debljinom stuka t_w , širinom prirubnice b_f i debljinom prirubnice t_f . Debljina t_{wc} je izračunata debljina stuka sa odbitkom za koroziju, a t_{fc} je debljina prirubnice sa odbitkom za koroziju. Debljine sa korозиjskim odbitkom izračunate su na način da je debljine struka i debljine prirubnice ekvivalentnog T profila oduzeta polovica korозиjskog dodatka.

Tablica 11. Pregled zadanih karakteristika za bulb profile

Karakteristika	Profil	h_w'	t_w'	A	W	h_w	t_w	t_{wc}	b_f	t_f	t_{fc}
bottom.S1	HP370x15	370	15	77	1267.5	331.78	15	13.5	68.22	38.22	36.72
	HP400x14	400	14	81.4	1488.6	358.52	14	12.5	71.70	41.48	39.98
	HP400x16	400	16	89.4	1591.4	358.52	16	14.5	73.70	41.48	39.98
	HP400x15	430	15	94.1	1833.2	385.26	15	13.5	77.18	44.74	43.24
	HP400x17	430	17	103	1954.5	385.26	17	15.5	79.18	44.74	43.24
bottom.S2	HP370x15	370	15	77	1267.5	331.78	15	13.5	68.22	38.22	36.72
	HP400x14	400	14	81.4	1488.6	358.52	14	12.5	71.70	41.48	39.98
	HP400x16	400	16	89.4	1591.4	358.52	16	14.5	73.70	41.48	39.98
	HP400x15	430	15	94.1	1833.2	385.26	15	13.5	77.18	44.74	43.24
	HP400x17	430	17	103	1954.5	385.26	17	15.5	79.18	44.74	43.24
bottom.S3	HP370x15	370	15	77	1267.5	331.78	15	13.5	68.22	38.22	36.72
	HP400x14	400	14	81.4	1488.6	358.52	14	12.5	71.70	41.48	39.98
	HP400x16	400	16	89.4	1591.4	358.52	16	14.5	73.70	41.48	39.98
	HP400x15	430	15	94.1	1833.2	385.26	15	13.5	77.18	44.74	43.24
	HP400x17	430	17	103	1954.5	385.26	17	15.5	79.18	44.74	43.24
osshell.S1	HP370x13	370	13	69.6	1179.7	331.78	13	11.5	66.22	38.22	36.72
	HP370x15	370	15	77	1267.5	331.78	15	13.5	68.22	38.22	36.72
	HP400x14	400	14	81.4	1488.6	358.52	14	12.5	71.70	41.48	39.98
	HP400x16	400	16	89.4	1591.4	358.52	16	14.5	73.70	41.48	39.98
	HP430x15	430	15	94.1	1833.2	385.26	15	13.5	77.18	44.74	43.24
	HP430x17	430	17	103	1954.5	385.26	17	15.5	79.18	44.74	43.24
osshell.S2	HP220x11.5	220	11.5	32.3	311.8	198.09	11.5	10	42.34	21.91	20.41
	HP240x10	240	10	32.4	351.3	215.91	10	8.5	43.82	24.09	22.59
	HP240x11	240	11	34.9	375.7	215.91	11	9.5	44.82	24.09	22.59
	HP240x12	240	12	37.3	394	215.91	12	10.5	45.82	24.09	22.59
	HP260x11	260	11	38.7	455.7	233.74	11	9.5	47.81	26.26	24.76
	HP260x12	260	12	41.3	477.7	233.74	12	10.5	48.81	26.26	24.76
	HP280x11	280	11	42.6	543.7	251.57	11	9.5	50.79	28.43	26.93
	HP280x12	280	12	45.5	571.1	251.57	12	10.5	51.79	28.43	26.93
	HP300x11	300	11	46.7	647.5	269.39	11	9.5	53.78	30.61	29.11
	HP300x12	300	12	49.7	679.8	269.39	12	10.5	54.78	30.61	29.11
	HP300x13	300	13	52.8	711.2	269.39	13	11.5	55.78	30.61	29.11
osshell.S3	HP220x10	220	10	29	288.7	198.09	10	8.5	40.84	21.91	20.41
	HP220x11.5	220	11.5	32.3	311.8	198.09	11.5	10	42.34	21.91	20.41
	HP240x10	240	10	32.4	351.3	215.91	10	8.5	43.82	24.09	22.59
	HP240x11	240	11	34.9	375.7	215.91	11	9.5	44.82	24.09	22.59
	HP240x12	240	12	37.3	394	215.91	12	10.5	45.82	24.09	22.59
	HP260x11	260	11	38.7	455.7	233.74	11	9.5	47.81	26.26	24.76
	HP260x12	260	12	41.3	477.7	233.74	12	10.5	48.81	26.26	24.76
	HP280x11	280	11	42.6	543.7	251.57	11	9.5	50.79	28.43	26.93
	HP280x12	280	12	45.5	571.1	251.57	12	10.5	51.79	28.43	26.93
	HP300x11	300	11	46.7	647.5	269.39	11	9.5	53.78	30.61	29.11
	HP300x12	300	12	49.7	679.8	269.39	12	10.5	54.78	30.61	29.11
	HP300x13	300	13	52.8	711.2	269.39	13	11.5	55.78	30.61	29.11

Karakteristika	Profil	h_w'	t_w'	A	W	h_w	t_w	t_{wc}	b_f	t_f	t_{fc}
osshell.S4	HP200x10	200	10	25.6	225.6	180.26	10	8.5	37.85	19.74	18.24
	HP200x11.5	200	11.5	28.6	246.5	180.26	11.5	10	39.35	19.74	18.24
	HP220x10	220	10	29	288.7	198.09	10	8.5	40.84	21.91	20.41
	HP220x11.5	220	11.5	32.3	311.8	198.09	11.5	10	42.34	21.91	20.41
	HP240x10	240	10	32.4	351.3	215.91	10	8.5	43.82	24.09	22.59
	HP240x11	240	11	34.9	375.7	215.91	11	9.5	44.82	24.09	22.59
	HP240x12	240	12	37.3	394	215.91	12	10.5	45.82	24.09	22.59
	HP260x11	260	11	38.7	455.7	233.74	11	9.5	47.81	26.26	24.76
	HP260x12	260	12	41.3	477.7	233.74	12	10.5	48.81	26.26	24.76
	HP280x11	280	11	42.6	543.7	251.57	11	9.5	50.79	28.43	26.93
	HP280x12	280	12	45.5	571.1	251.57	12	10.5	51.79	28.43	26.93
	HP300x11	300	11	46.7	647.5	269.39	11	9.5	53.78	30.61	29.11
	HP300x12	300	12	49.7	679.8	269.39	12	10.5	54.78	30.61	29.11
	HP300x13	300	13	52.8	711.2	269.39	13	11.5	55.78	30.61	29.11
osshell.S5	HP260x11	260	11	38.7	455.7	233.74	11	9.5	47.81	26.26	24.76
	HP260x12	260	12	41.3	477.7	233.74	12	10.5	48.81	26.26	24.76
	HP280x11	280	11	42.6	543.7	251.57	11	9.5	50.79	28.43	26.93
	HP280x12	280	12	45.5	571.1	251.57	12	10.5	51.79	28.43	26.93
	HP300x11	300	11	46.7	647.5	269.39	11	9.5	53.78	30.61	29.11
	HP300x12	300	12	49.7	679.8	269.39	12	10.5	54.78	30.61	29.11
	HP300x13	300	13	52.8	711.2	269.39	13	11.5	55.78	30.61	29.11
osshell.S6	HP280x11	280	11	42.6	543.7	251.57	11	9.5	50.79	28.43	26.93
	HP280x12	280	12	45.5	571.1	251.57	12	10.5	51.79	28.43	26.93
	HP300x11	300	11	46.7	647.5	269.39	11	9.5	53.78	30.61	29.11
	HP300x12	300	12	49.7	679.8	269.39	12	10.5	54.78	30.61	29.11
	HP300x13	300	13	52.8	711.2	269.39	13	11.5	55.78	30.61	29.11
	HP320x12	320	12	54.2	793.6	287.22	12	10.5	57.76	32.78	31.28
	HP320x13	320	13	57.4	829.4	287.22	13	11.5	58.76	32.78	31.28
deck.S1	HP180x8	180	8	18.9	154.2	162.43	8	6	32.87	17.57	15.57
	HP180x9	180	9	20.7	164.7	162.43	9	7	33.87	17.57	15.57
	HP180x10	180	10	22.5	177.1	162.43	10	8	34.87	17.57	15.57
	HP200x9	200	9	23.6	212.5	180.26	9	7	36.85	19.74	17.74
	HP200x10	200	10	25.6	225.6	180.26	10	8	37.85	19.74	17.74
	HP200x11.5	200	11.5	28.6	246.5	180.26	11.5	9.5	39.35	19.74	17.74
	HP220x10	220	10	29	288.7	198.09	10	8	40.84	21.91	19.91
	HP220x11.5	220	11.5	32.3	311.8	198.09	11.5	9.5	42.34	21.91	19.91
	HP240x10	240	10	32.4	351.3	215.91	10	8	43.82	24.09	22.09
	HP240x11	240	11	34.9	375.7	215.91	11	9	44.82	24.09	22.09
	HP240x12	240	12	37.3	394	215.91	12	10	45.82	24.09	22.09
	HP260x11	260	11	38.7	455.7	233.74	11	9	47.81	26.26	24.26
	HP260x12	260	12	41.3	477.7	233.74	12	10	48.81	26.26	24.26
	HP280x11	280	11	42.6	543.7	251.57	11	9	50.79	28.43	26.43
	HP280x12	280	12	45.5	571.1	251.57	12	10	51.79	28.43	26.43

Karakteristika	Profil	h_w'	t_w'	A	W	h_w	t_w	t_{wc}	b_f	t_f	t_{fc}
deck.S2	HP160x8	160	8	16.2	115.1	144.61	8	6.75	29.88	15.39	14.14
	HP160x9	160	9	17.8	124.2	144.61	9	7.75	30.88	15.39	14.14
	HP180x8	180	8	18.9	154.2	162.43	8	6.75	32.87	17.57	16.32
	HP180x9	180	9	20.7	164.7	162.43	9	7.75	33.87	17.57	16.32
	HP180x10	180	10	22.5	177.1	162.43	10	8.75	34.87	17.57	16.32
	HP200x9	200	9	23.6	212.5	180.26	9	7.75	36.85	19.74	18.49
	HP200x10	200	10	25.6	225.6	180.26	10	8.75	37.85	19.74	18.49
	HP200x11.5	200	11.5	28.6	246.5	180.26	11.5	10.25	39.35	19.74	18.49
	HP220x10	220	10	29	288.7	198.09	10	8.75	40.84	21.91	20.66
	HP220x11.5	220	11.5	32.3	311.8	198.09	11.5	10.25	42.34	21.91	20.66
	HP240x10	240	10	32.4	351.3	215.91	10	8.75	43.82	24.09	22.84
	HP240x11	240	11	34.9	375.7	215.91	11	9.75	44.82	24.09	22.84
	HP240x12	240	12	37.3	394	215.91	12	10.75	45.82	24.09	22.84
	HP260x11	260	11	38.7	455.7	233.74	11	9.75	47.81	26.26	25.01
	HP260x12	260	12	41.3	477.7	233.74	12	10.75	48.81	26.26	25.01
	HP280x11	280	11	42.6	543.7	251.57	11	9.75	50.79	28.43	27.18
	HP280x12	280	12	45.5	571.1	251.57	12	10.75	51.79	28.43	27.18
	HP300x11	300	11	46.7	647.5	269.39	11	9.75	53.78	30.61	29.36
	HP300x12	300	12	49.7	679.8	269.39	12	10.75	54.78	30.61	29.36
	HP300x13	300	13	52.8	711.2	269.39	13	11.75	55.78	30.61	29.36
inbottom.S1	HP320x12	320	12	54.2	793.6	287.22	12	10.75	57.76	32.78	31.53
	HP320x13	320	13	57.4	829.4	287.22	13	11.75	58.76	32.78	31.53
	HP340x12	340	12	58.8	916.7	305.04	12	10.75	60.75	34.96	33.71
	HP340x14	340	14	65.5	997.4	305.04	14	12.75	62.75	34.96	33.71
	HP370x13	370	13	69.6	1179.7	331.78	13	11.5	66.22	38.22	36.72
	HP370x15	370	15	77	1267.5	331.78	15	13.5	68.22	38.22	36.72
inhopper.S1	HP400x14	400	14	81.4	1488.6	358.52	14	12.5	71.70	41.48	39.98
	HP400x16	400	16	89.4	1591.4	358.52	16	14.5	73.70	41.48	39.98
	HP430x15	430	15	94.1	1833.2	385.26	15	13.5	77.18	44.74	43.24
	HP430x17	430	17	103	1954.5	385.26	17	15.5	79.18	44.74	43.24
	HP370x13	370	13	69.6	1179.7	331.78	13	11.5	66.22	38.22	36.72
	HP370x15	370	15	77	1267.5	331.78	15	13.5	68.22	38.22	36.72
isshell.S1	HP400x14	400	14	81.4	1488.6	358.52	14	12.5	71.70	41.48	39.98
	HP400x16	400	16	89.4	1591.4	358.52	16	14.5	73.70	41.48	39.98
	HP430x15	430	15	94.1	1833.2	385.26	15	13.5	77.18	44.74	43.24
	HP430x17	430	17	103	1954.5	385.26	17	15.5	79.18	44.74	43.24
	HP340x12	340	12	58.8	916.7	305.04	12	10.5	60.75	34.96	33.46
	HP340x14	340	14	65.5	997.4	305.04	14	12.5	62.75	34.96	33.46
	HP370x13	370	13	69.6	1179.7	331.78	13	11.5	66.22	38.22	36.72
	HP370x15	370	15	77	1267.5	331.78	15	13.5	68.22	38.22	36.72
isshell.S2	HP400x14	400	14	81.4	1488.6	358.52	14	12.5	71.70	41.48	39.98
	HP400x16	400	16	89.4	1591.4	358.52	16	14.5	73.70	41.48	39.98
	HP430x15	430	15	94.1	1833.2	385.26	15	13.5	77.18	44.74	43.24
	HP430x17	430	17	103	1954.5	385.26	17	15.5	79.18	44.74	43.24
	HP340x12	340	12	58.8	916.7	305.04	12	10.5	60.75	34.96	33.46
	HP340x14	340	14	65.5	997.4	305.04	14	12.5	62.75	34.96	33.46
	HP370x13	370	13	69.6	1179.7	331.78	13	11.5	66.22	38.22	36.72
	HP370x15	370	15	77	1267.5	331.78	15	13.5	68.22	38.22	36.72

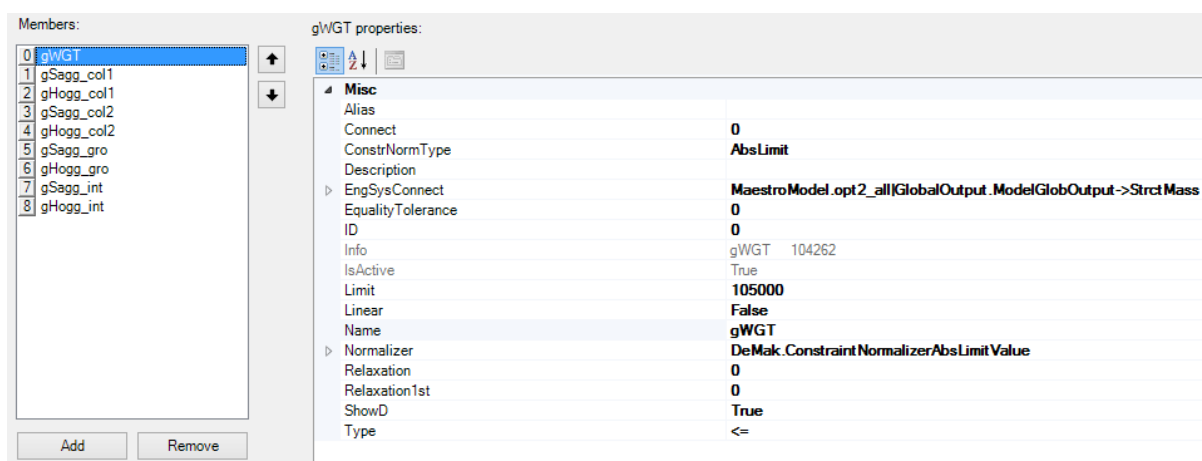
Karakteristika	Profil	h_w'	t_w'	A	W	h_w	t_w	t_{wc}	b_f	t_f	t_{fc}
isshell.S3	HP320x12	320	12	54.2	793.6	287.22	12	10.5	57.76	32.78	31.28
	HP320x13	320	13	57.4	829.4	287.22	13	11.5	58.76	32.78	31.28
	HP340x12	340	12	58.8	916.7	305.04	12	10.5	60.75	34.96	33.46
	HP340x14	340	14	65.5	997.4	305.04	14	12.5	62.75	34.96	33.46
	HP370x13	370	13	69.6	1179.7	331.78	13	11.5	66.22	38.22	36.72
	HP370x15	370	15	77	1267.5	331.78	15	13.5	68.22	38.22	36.72
	HP400x14	400	14	81.4	1488.6	358.52	14	12.5	71.70	41.48	39.98
	HP400x16	400	16	89.4	1591.4	358.52	16	14.5	73.70	41.48	39.98
	HP430x15	430	15	94.1	1833.2	385.26	15	13.5	77.18	44.74	43.24
	HP430x17	430	17	103	1954.5	385.26	17	15.5	79.18	44.74	43.24
isshell.S4	HP300x11	300	11	46.7	647.5	269.39	11	9.5	53.78	30.61	29.11
	HP300x12	300	12	49.7	679.8	269.39	12	10.5	54.78	30.61	29.11
	HP300x13	300	13	52.8	711.2	269.39	13	11.5	55.78	30.61	29.11
	HP320x12	320	12	54.2	793.6	287.22	12	10.5	57.76	32.78	31.28
	HP320x13	320	13	57.4	829.4	287.22	13	11.5	58.76	32.78	31.28
	HP340x12	340	12	58.8	916.7	305.04	12	10.5	60.75	34.96	33.46
	HP340x14	340	14	65.5	997.4	305.04	14	12.5	62.75	34.96	33.46
isshell.S5	HP300x11	300	11	46.7	647.5	269.39	11	9.5	53.78	30.61	29.11
	HP300x12	300	12	49.7	679.8	269.39	12	10.5	54.78	30.61	29.11
	HP300x13	300	13	52.8	711.2	269.39	13	11.5	55.78	30.61	29.11
	HP320x12	320	12	54.2	793.6	287.22	12	10.5	57.76	32.78	31.28
	HP320x13	320	13	57.4	829.4	287.22	13	11.5	58.76	32.78	31.28
	HP340x12	340	12	58.8	916.7	305.04	12	10.5	60.75	34.96	33.46
	HP340x14	340	14	65.5	997.4	305.04	14	12.5	62.75	34.96	33.46
isshell.S6	HP280x12	280	12	45.5	571.1	251.57	12	10	51.79	28.43	26.43
	HP300x11	300	11	46.7	647.5	269.39	11	9	53.78	30.61	28.61
	HP300x12	300	12	49.7	679.8	269.39	12	10	54.78	30.61	28.61
	HP300x13	300	13	52.8	711.2	269.39	13	11	55.78	30.61	28.61
	HP320x12	320	12	54.2	793.6	287.22	12	10	57.76	32.78	30.78
	HP320x13	320	13	57.4	829.4	287.22	13	11	58.76	32.78	30.78
	HP340x12	340	12	58.8	916.7	305.04	12	10	60.75	34.96	32.96
	HP340x14	340	14	65.5	997.4	305.04	14	12	62.75	34.96	32.96
isshell.S7	HP260x11	260	11	38.7	455.7	233.74	11	9	47.81	26.26	24.26
	HP260x12	260	12	41.3	477.7	233.74	12	10	48.81	26.26	24.26
	HP280x11	280	11	42.6	543.7	251.57	11	9	50.79	28.43	26.43
	HP280x12	280	12	45.5	571.1	251.57	12	10	51.79	28.43	26.43
	HP300x11	300	11	46.7	647.5	269.39	11	9	53.78	30.61	28.61
	HP300x12	300	12	49.7	679.8	269.39	12	10	54.78	30.61	28.61
	HP300x13	300	13	52.8	711.2	269.39	13	11	55.78	30.61	28.61

Karakteristika	Profil	h_w'	t_w'	A	W	h_w	t_w	t_{wc}	b_f	t_f	t_{fc}
inwing.S1	HP160x9	160	9	17.8	124.2	144.61	9	7	30.88	15.39	13.39
	HP180x8	180	8	18.9	154.2	162.43	8	6	32.87	17.57	15.57
	HP180x9	180	9	20.7	164.7	162.43	9	7	33.87	17.57	15.57
	HP180x10	180	10	22.5	177.1	162.43	10	8	34.87	17.57	15.57
	HP200x9	200	9	23.6	212.5	180.26	9	7	36.85	19.74	17.74
	HP200x10	200	10	25.6	225.6	180.26	10	8	37.85	19.74	17.74
	HP200x11.5	200	11.5	28.6	246.5	180.26	11.5	9.5	39.35	19.74	17.74
	HP220x10	220	10	29	288.7	198.09	10	8	40.84	21.91	19.91
	HP220x11.5	220	11.5	32.3	311.8	198.09	11.5	9.5	42.34	21.91	19.91
	HP240x10	240	10	32.4	351.3	215.91	10	8	43.82	24.09	22.09
	HP240x11	240	11	34.9	375.7	215.91	11	9	44.82	24.09	22.09
	HP240x12	240	12	37.3	394	215.91	12	10	45.82	24.09	22.09
	HP260x11	260	11	38.7	455.7	233.74	11	9	47.81	26.26	24.26
	HP260x12	260	12	41.3	477.7	233.74	12	10	48.81	26.26	24.26
	HP280x11	280	11	42.6	543.7	251.57	11	9	50.79	28.43	26.43
	HP280x12	280	12	45.5	571.1	251.57	12	10	51.79	28.43	26.43
	HP300x11	300	11	46.7	647.5	269.39	11	9	53.78	30.61	28.61
	HP300x12	300	12	49.7	679.8	269.39	12	10	54.78	30.61	28.61
	HP300x13	300	13	52.8	711.2	269.39	13	11	55.78	30.61	28.61
inwing.S2	HP160x8	160	8	16.2	115.1	144.61	8	6	29.88	15.39	13.39
	HP160x9	160	9	17.8	124.2	144.61	9	7	30.88	15.39	13.39
	HP180x8	180	8	18.9	154.2	162.43	8	6	32.87	17.57	15.57
	HP180x9	180	9	20.7	164.7	162.43	9	7	33.87	17.57	15.57
	HP180x10	180	10	22.5	177.1	162.43	10	8	34.87	17.57	15.57
	HP200x9	200	9	23.6	212.5	180.26	9	7	36.85	19.74	17.74
	HP200x10	200	10	25.6	225.6	180.26	10	8	37.85	19.74	17.74
	HP200x11.5	200	11.5	28.6	246.5	180.26	11.5	9.5	39.35	19.74	17.74
	HP220x10	220	10	29	288.7	198.09	10	8	40.84	21.91	19.91
	HP220x11.5	220	11.5	32.3	311.8	198.09	11.5	9.5	42.34	21.91	19.91
	HP240x10	240	10	32.4	351.3	215.91	10	8	43.82	24.09	22.09
	HP240x11	240	11	34.9	375.7	215.91	11	9	44.82	24.09	22.09
	HP240x12	240	12	37.3	394	215.91	12	10	45.82	24.09	22.09
	HP260x11	260	11	38.7	455.7	233.74	11	9	47.81	26.26	24.26
	HP260x12	260	12	41.3	477.7	233.74	12	10	48.81	26.26	24.26
	HP280x11	280	11	42.6	543.7	251.57	11	9	50.79	28.43	26.43
	HP280x12	280	12	45.5	571.1	251.57	12	10	51.79	28.43	26.43
	HP300x11	300	11	46.7	647.5	269.39	11	9	53.78	30.61	28.61
	HP300x12	300	12	49.7	679.8	269.39	12	10	54.78	30.61	28.61
	HP300x13	300	13	52.8	711.2	269.39	13	11	55.78	30.61	28.61
	HP320x12	320	12	54.2	793.6	287.22	12	10	57.76	32.78	30.78
	HP320x13	320	13	57.4	829.4	287.22	13	11	58.76	32.78	30.78
	HP340x12	340	12	58.8	916.7	305.04	12	10.5	60.75	34.96	33.46
	HP340x14	340	14	65.5	997.4	305.04	14	12.5	62.75	34.96	33.46
	HP370x13	370	13	69.6	1179.7	331.78	13	11.5	66.22	38.22	36.72
	HP370x15	370	15	77	1267.5	331.78	15	13.5	68.22	38.22	36.72

Karakteristika	Profil	h_w'	t_w'	A	W	h_w	t_w	t_{wc}	b_f	t_f	t_{fc}
upstool.S1	HP160x7	160	7	14.6	106.2	144.61	7	5.75	28.88	15.39	14.14
	HP160x8	160	8	16.2	115.1	144.61	8	6.75	29.88	15.39	14.14
	HP160x9	160	9	17.8	124.2	144.61	9	7.75	30.88	15.39	14.14
	HP180x8	180	8	18.9	154.2	162.43	8	6.75	32.87	17.57	16.32
	HP180x9	180	9	20.7	164.7	162.43	9	7.75	33.87	17.57	16.32
	HP180x10	180	10	22.5	177.1	162.43	10	8.75	34.87	17.57	16.32
	HP200x9	200	9	23.6	212.5	180.26	9	7.75	36.85	19.74	18.49
	HP200x10	200	10	25.6	225.6	180.26	10	8.75	37.85	19.74	18.49
	HP200x11.5	200	11.5	28.6	246.5	180.26	11.5	10.25	39.35	19.74	18.49
	HP220x10	220	10	29	288.7	198.09	10	8.75	40.84	21.91	20.66
	HP220x11.5	220	11.5	32.3	311.8	198.09	11.5	10.25	42.34	21.91	20.66
	HP240x10	240	10	32.4	351.3	215.91	10	8.75	43.82	24.09	22.84
	HP240x11	240	11	34.9	375.7	215.91	11	9.75	44.82	24.09	22.84
	HP240x12	240	12	37.3	394	215.91	12	10.75	45.82	24.09	22.84
	HP260x11	260	11	38.7	455.7	233.74	11	9.75	47.81	26.26	25.01
	HP260x12	260	12	41.3	477.7	233.74	12	10.75	48.81	26.26	25.01
	HP280x11	280	11	42.6	543.7	251.57	11	9.75	50.79	28.43	27.18
	HP280x12	280	12	45.5	571.1	251.57	12	10.75	51.79	28.43	27.18
	HP300x11	300	11	46.7	647.5	269.39	11	9.75	53.78	30.61	29.36
	HP300x12	300	12	49.7	679.8	269.39	12	10.75	54.78	30.61	29.36
	HP300x13	300	13	52.8	711.2	269.39	13	11.75	55.78	30.61	29.36
upstool.S2	HP160x7	160	7	14.6	106.2	144.61	7	5.75	28.88	15.39	14.14
	HP160x8	160	8	16.2	115.1	144.61	8	6.75	29.88	15.39	14.14
	HP160x9	160	9	17.8	124.2	144.61	9	7.75	30.88	15.39	14.14
	HP180x8	180	8	18.9	154.2	162.43	8	6.75	32.87	17.57	16.32
	HP180x9	180	9	20.7	164.7	162.43	9	7.75	33.87	17.57	16.32
	HP180x10	180	10	22.5	177.1	162.43	10	8.75	34.87	17.57	16.32
	HP200x9	200	9	23.6	212.5	180.26	9	7.75	36.85	19.74	18.49
	HP200x10	200	10	25.6	225.6	180.26	10	8.75	37.85	19.74	18.49
	HP200x11.5	200	11.5	28.6	246.5	180.26	11.5	10.25	39.35	19.74	18.49
	HP220x10	220	10	29	288.7	198.09	10	8.75	40.84	21.91	20.66
	HP220x11.5	220	11.5	32.3	311.8	198.09	11.5	10.25	42.34	21.91	20.66
	HP240x10	240	10	32.4	351.3	215.91	10	8.75	43.82	24.09	22.84
	HP240x11	240	11	34.9	375.7	215.91	11	9.75	44.82	24.09	22.84
	HP240x12	240	12	37.3	394	215.91	12	10.75	45.82	24.09	22.84
lowstool.S1	HP200x9	200	9	23.6	212.5	180.26	9	7.75	36.85	19.74	18.49
	HP200x10	200	10	25.6	225.6	180.26	10	8.75	37.85	19.74	18.49
	HP200x11.5	200	11.5	28.6	246.5	180.26	11.5	10.25	39.35	19.74	18.49
	HP220x10	220	10	29	288.7	198.09	10	8.75	40.84	21.91	20.66
	HP220x11.5	220	11.5	32.3	311.8	198.09	11.5	10.25	42.34	21.91	20.66
	HP240x10	240	10	32.4	351.3	215.91	10	8.75	43.82	24.09	22.84
	HP240x11	240	11	34.9	375.7	215.91	11	9.75	44.82	24.09	22.84
lowstool.S2	HP240x12	240	12	37.3	394	215.91	12	10.75	45.82	24.09	22.84
	HP200x11.5	200	11.5	28.6	246.5	180.26	11.5	10.25	39.35	19.74	18.49
	HP220x10	220	10	29	288.7	198.09	10	8.75	40.84	21.91	20.66
	HP220x11.5	220	11.5	32.3	311.8	198.09	11.5	10.25	42.34	21.91	20.66
	HP240x10	240	10	32.4	351.3	215.91	10	8.75	43.82	24.09	22.84
	HP240x11	240	11	34.9	375.7	215.91	11	9.75	44.82	24.09	22.84
	HP240x12	240	12	37.3	394	215.91	12	10.75	45.82	24.09	22.84
	HP260x11	260	11	38.7	455.7	233.74	11	9.75	47.81	26.26	25.01
	HP260x12	260	12	41.3	477.7	233.74	12	10.75	48.81	26.26	25.01

5.4.3. Ograničenja

Ograničenja se iz učitano modela automatski učitavaju. Ograničenja koja su bila automatski učitana nisu bila korištena u ovom radu. U radu su se definirala vlastita ograničenja optimizacije. Preko parametra podobnosti zadana su ograničenja vezana za granični momet savijanja kako u pregibu, tako u progibu, te ograničenje vezano uz masu. Za svako ograničenje definirana je granična vrijednost (limit) i tip uvijeta koji mora zadovoljiti, odnosno, da li treba biti veće, jednako ili manje od zadane granične vrijednosti.

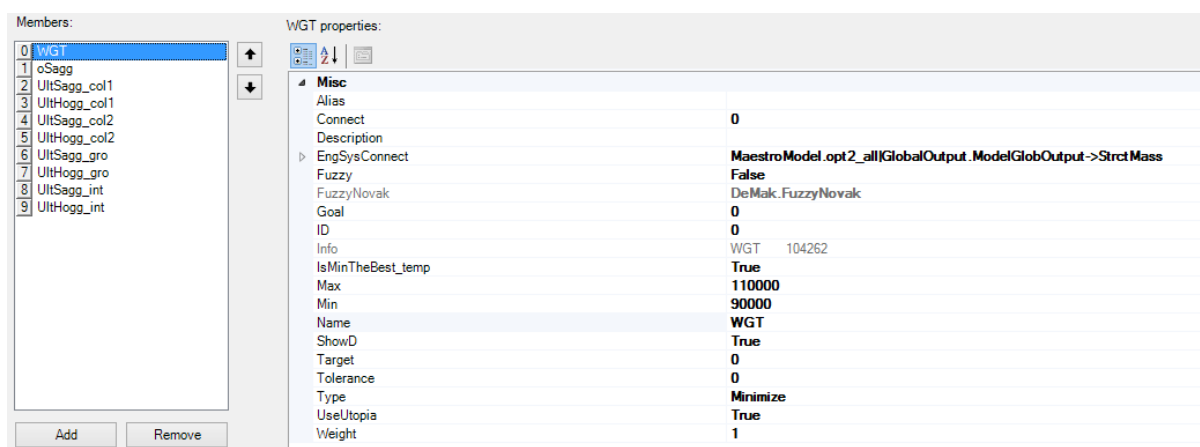


Slika 24. Definirana ograničenja vezana uz parametar podobnosti

Granica kod ograničenja mase je 105 000 tona, te je zahtjev da traženi projekti imaju manju masu od ograničenja. Procjena granice na 105 000 tona je vezana uz masu prototipa koja iznosi 104262 tone. Parametri pogodnosti za slučajeve progiba, odnosno pregiba imaju ograničenje na vrijednosti nula, te je zahtjev da traženi projekti imaju veću vrijednost od nule. To ograničenje proizlazi iz definicije parametra pogodnosti objašnjene u točki 2.2. Parametar podobnosti. Ograničenja parametra pogodnosti zadana su za slučaj neoštećenog trupa, te dva slučaja oštećenja, nasukavanje i sudar.

5.4.4. Atributi

U ovom radu definirano je devet atributa. Prvi je vezan uz minimiziranje mase strukture. Drugi atribut definiran je faktorom podobnosti vezanim uz granični moment savijanja u slučaju progiba neoštećenog modela za koji se zahtijeva da bude maksimiziran. Ostali atributi su vezana uz granične momente savijanja u slučaju progib, odnosno pregiba, za neoštećeni trup, te za trup sa oštećenjem dna, odnosno oštećenjem boka.

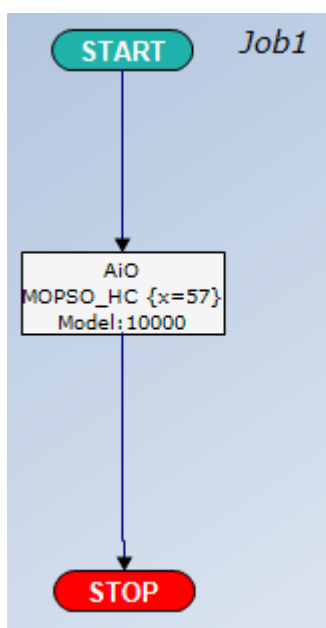


Slika 25. Definirani atributi

Ciljevi optimizacijskog problema su minimiziranje mase, te maksimiziranje faktora podobnosti za slučaj progiba neoštećenog trupa. Cilj vezan uz faktor podobnosti za slučaj progiba odabran je analizom predhodnih rezultata za granične momente savijanja trupa broda kojom je utvrđeno da je upravo taj slučaj kritičan, te ako se zadovolje zahtjevi za graničnim momentom u tom slučaju, može se pretpostaviti da će biti zadovoljeni i granični momenti ostalih slučajeva, odnosno pregiba kod neoštećenog modela, te progiba i pregiba modela sa oštećenjem dna, odnosno boka.

5.4.5. Optimizacijski algoritam

DeMak nudi čitav niz algoritama za rješavanje optimizacijskih zadataka. U ovom radu korišteni optimizacijski algoritam je MOPSO Hypercube.



Slika 26. Slijed optimizacije

The screenshot shows the 'Multi Objective Particle Swarm Optimization Control' dialog box with the following settings:

- General**
 - Num Iterations: 100
 - Max Num. NDOM: 500
 - Manual Seed: ☐ (Value: 1234)
- Constraint Handling and Design Sorting**
 - Constraint Handling Method: CPSO
 - Design Sorting Method: OnlyUnfeasible
- Particle Swarm**
 - Num Particles: 100
 - Global Confidence: 2.5
 - Inertia Parameter: 1.4 - 0.35
 - Individual Confidence: 1.5
- Move Algorithm Selection**
 - ☒ **Hypercube**
 - Num. Attribute Divisions: 10
 - ☐ **Sigma**
 - No Global Best Prop:
 - ☐ **MOCLPSO**
 - Learning Step:
 - Learning Probability:
 - Elitism Probability:

Buttons at the bottom: OK, Cancel.

Slika 27. Korišteni kontrolni parametri višeciljne optimizacije rojem čestica

5.4.6. Rješenja optimizacijskog problema

Optimizacijom se došlo do 420 nedominiranih projekata.

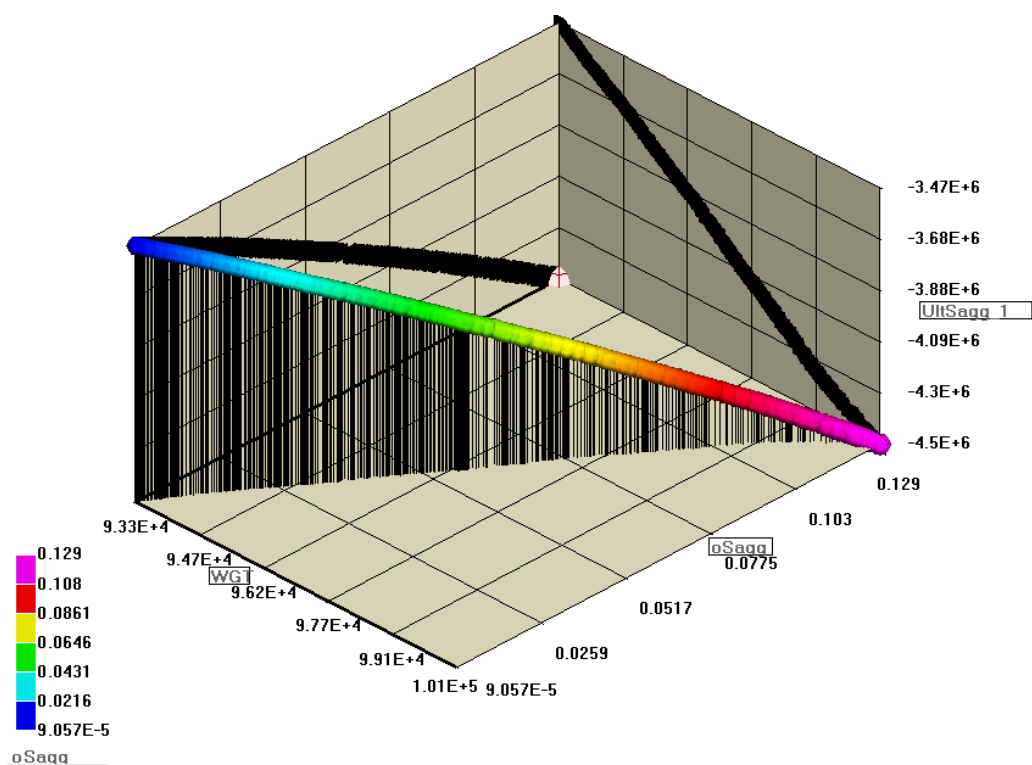
Analizom projekata dobivenih nakon optimizacije pokušalo se pronaći projekte koji će uz najmanju moguću masu imati zadovoljen zahtjev za granični moment savijanja. Najprije su se pomoću programa MARS2000 ispitali krajnji projekti na Pareto fronti, odnosno projekt sa najmanjom masom (Projekt 420), te projekt sa najvećim graničnim momentom savijanja za slučaj progiba (Projekt0). Projekt sa najmanjom masom globalno nije zadovoljio sve zahtjeve za graničnu čvrstoću. Projekt sa najvećim graničnim momentom zadovoljio je sve zahtjeve za graničnu čvrstoću, ali valja napomenuti kako nisu svi elementi zadovoljili lokalne kriterije (najčešće maksimalnih smičnih naprezanja), kao na primjer dijelovi boka i dijelovi palube.

Pareto fronta prikazana na slici 28. proteže se između vrijednosti masa od 100 584 (projekt 0) tone do 93 253 tone (projekt 420). Nedominirana rješenja protežu se između vrijednosti parametara podobnosti (bez korekcije za sigurnost) za slučaj progiba neoštećenog modela od 0.1073 (projekt 0) do 0.0001 (projekt 420).

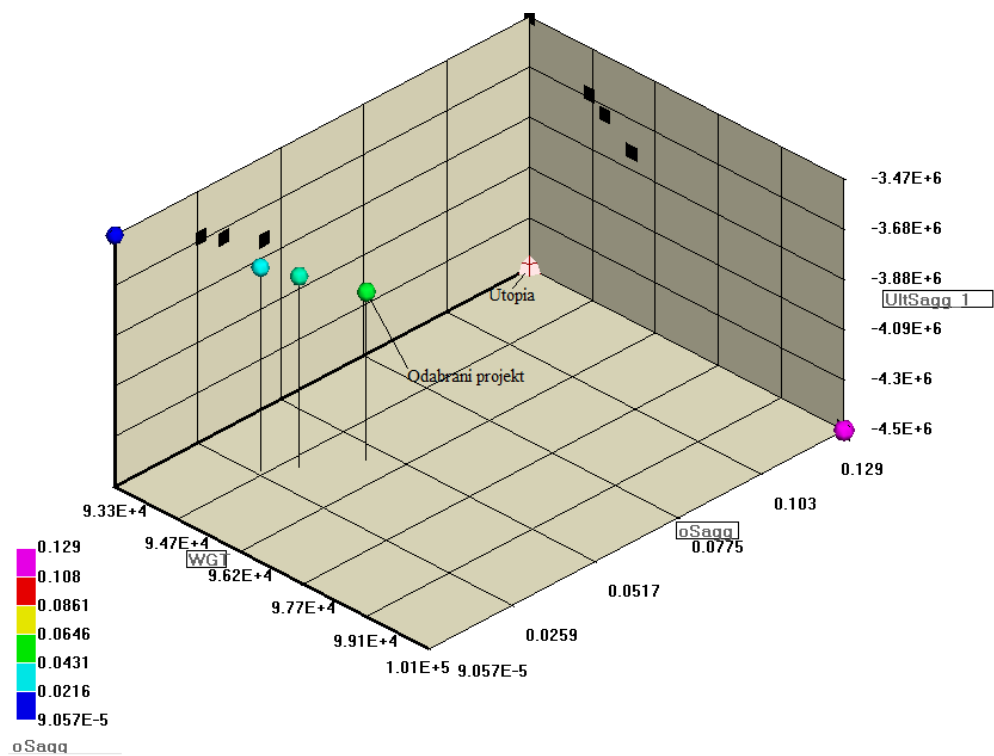
Ispitivanjem projekata na odabranom zanimljivom području Pareto fronte prikazane na slici 28., područje označeno zelenom bojom, pronađen je projekt koji gotovo u potpunosti odgovara traženom projektu koji sa što manjom masom ima što veći granični moment savijanja. Radi se o Projektu 305, te bi se moglo reć da otprilike od Projekta 0 pa do Projekta 305 svi projekti zadovoljavaju sve zahtjeve provjeravane pomoću programa MARS, te da nakon njega, do Projekta 420 slijede projekti koji ne zadovoljavaju zahtjev za granični moment savijanja.

Na slici 29. prikazani su projekti s najmanjom masom, najvećim momentom savijanja u progibu, projekti kojima granični momenta savijanja zadovoljava zahtjeve prema MARS-u, te utopia.

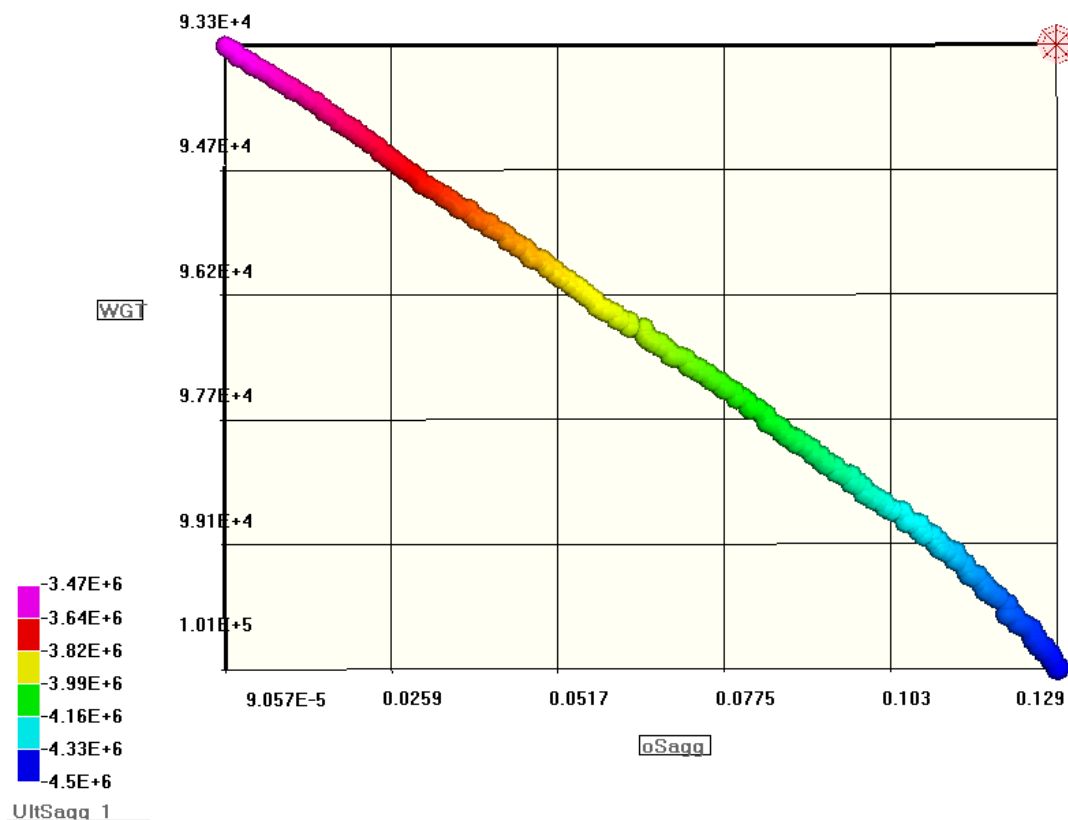
Na slici 30. prikazana je Pareto fronta, odnosno nedominirani projekti u ovisnosti o ciljevima. Ciljevi su bili minimizacija mase, te maksimizacija faktora podobnosti za moment savijanja u slučaju progiba.



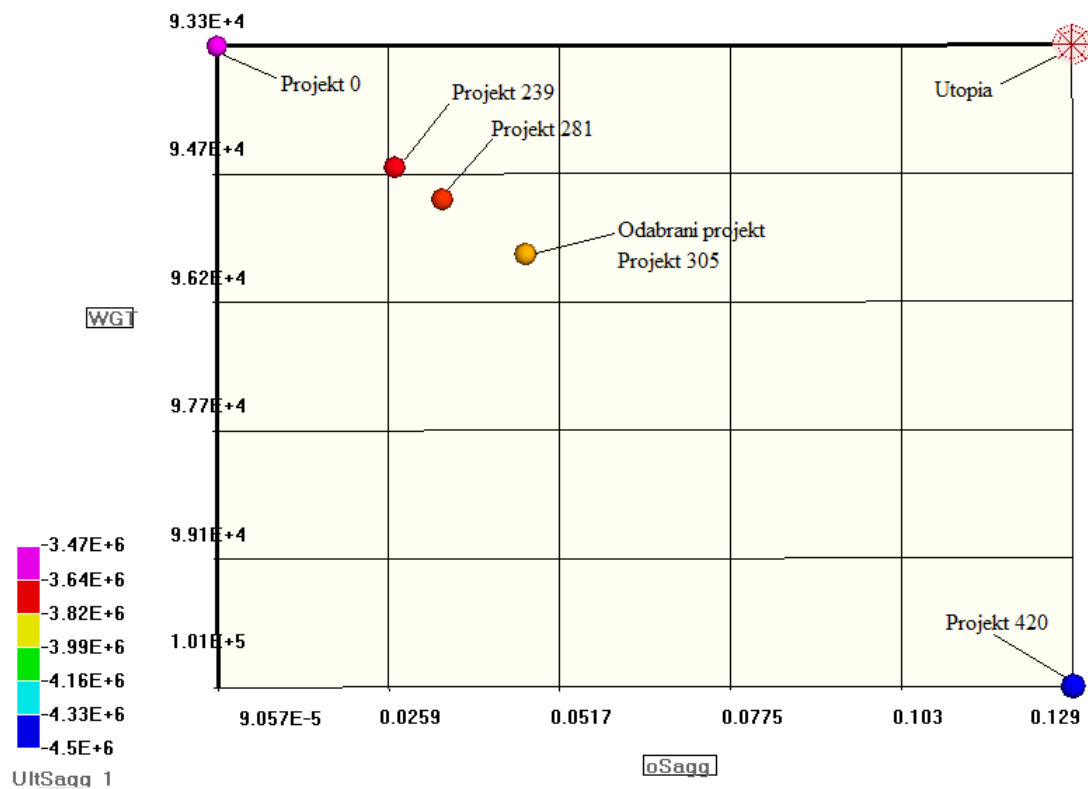
Slika 28. Prikaz Pareto fronte u ovisnosti o težini, momentu savijanja u progibu, te parametru podobnosti momenta savijanja za progib



Slika 29. Promatrani projekti na Pareto fronti



Slika 30. Prikaz nedominirani projekti u ovisnosti o ciljevima

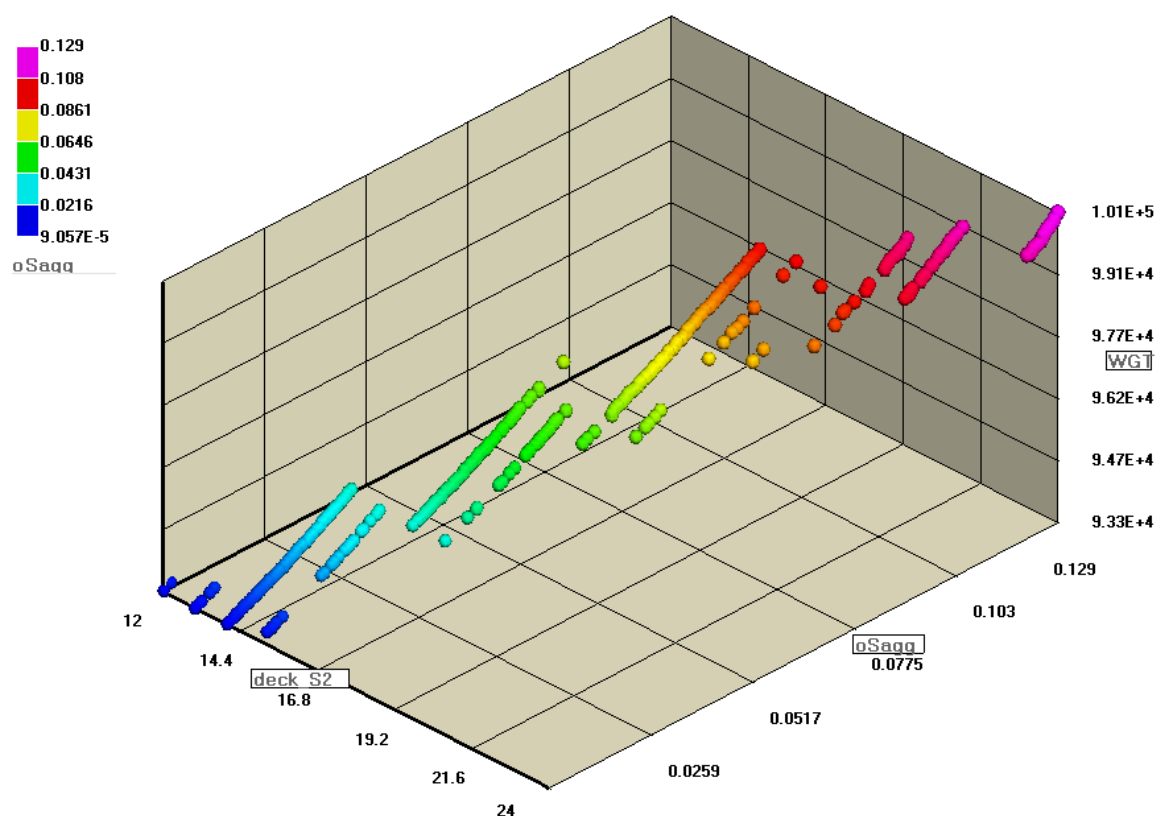


Slika 31. Prikaz promatranih nedominirani projekti u ovisnosti o ciljevima

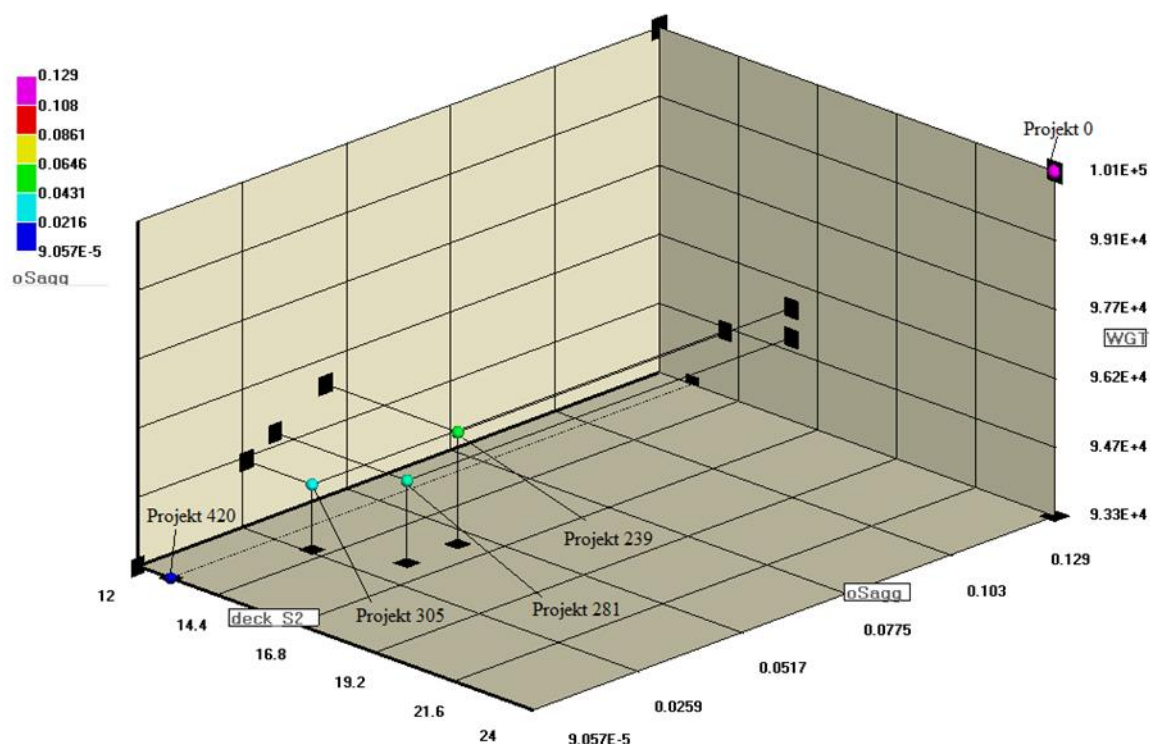
Slijedi prikaz Pareto fronti za projektne varijable.

Na slikama 32. do 35. je prikazana Pareto fronta koja prikazuje ovisnost varijable deck_P3 o atributima mase i faktora podobnosti za slučaj progiba. Iz slika 32., 33., 34. i 35. se vidi kako su za razne projekte odabrane razne debljine palube od 12 mm pa do 19.5 mm. Minimalna zadana vrijednost varijable u optimizacijskom problemu bila je 11 mm.

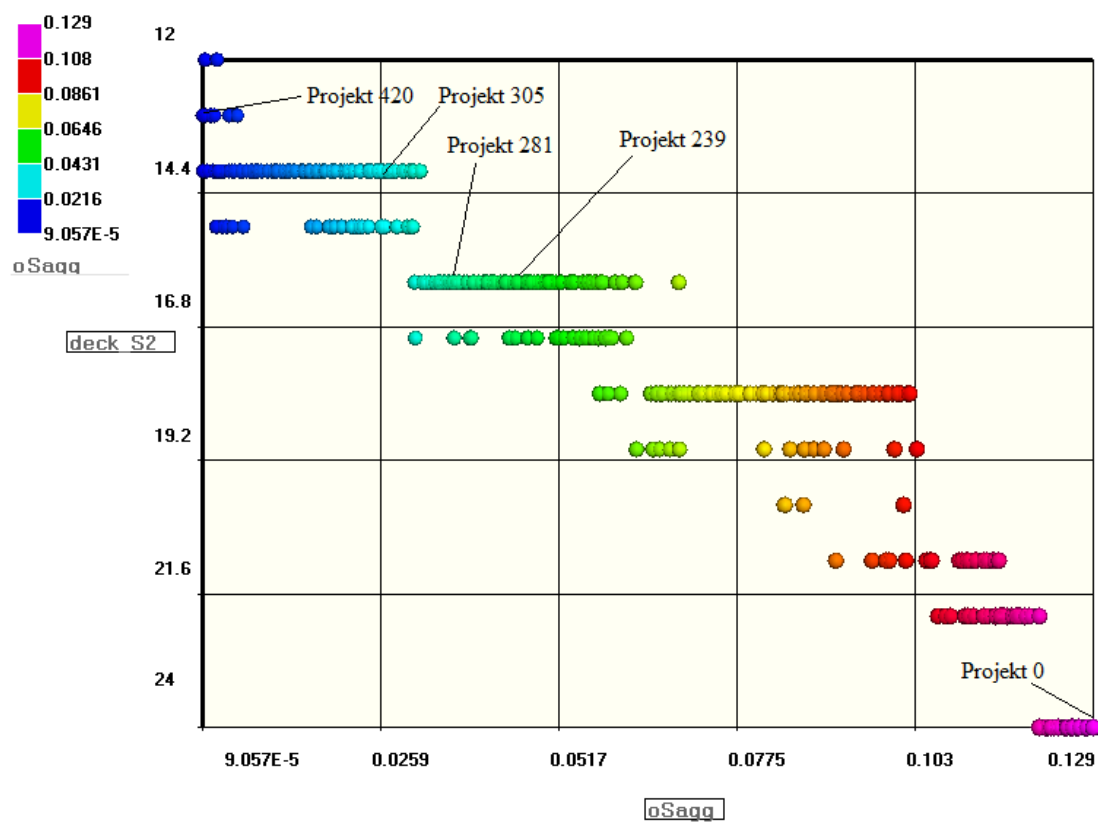
Na slikama 36. do 39. je prikazana Pareto fronta koja prikazuje ovisnost varijable bottom_P1 o atributima mase i faktora podobnosti za slučaj progiba. Iz slika 36., 37., 38. i 39. se vidi kako je u svim projektima jednaka debljina za vanjsku oplatu dvodna. Radi se o minimalnoj vrijednosti (15 mm) za zadanu varijablu. Maksimalna zadana vrijednost varijable u optimizacijskom problemu bila je 18 mm.



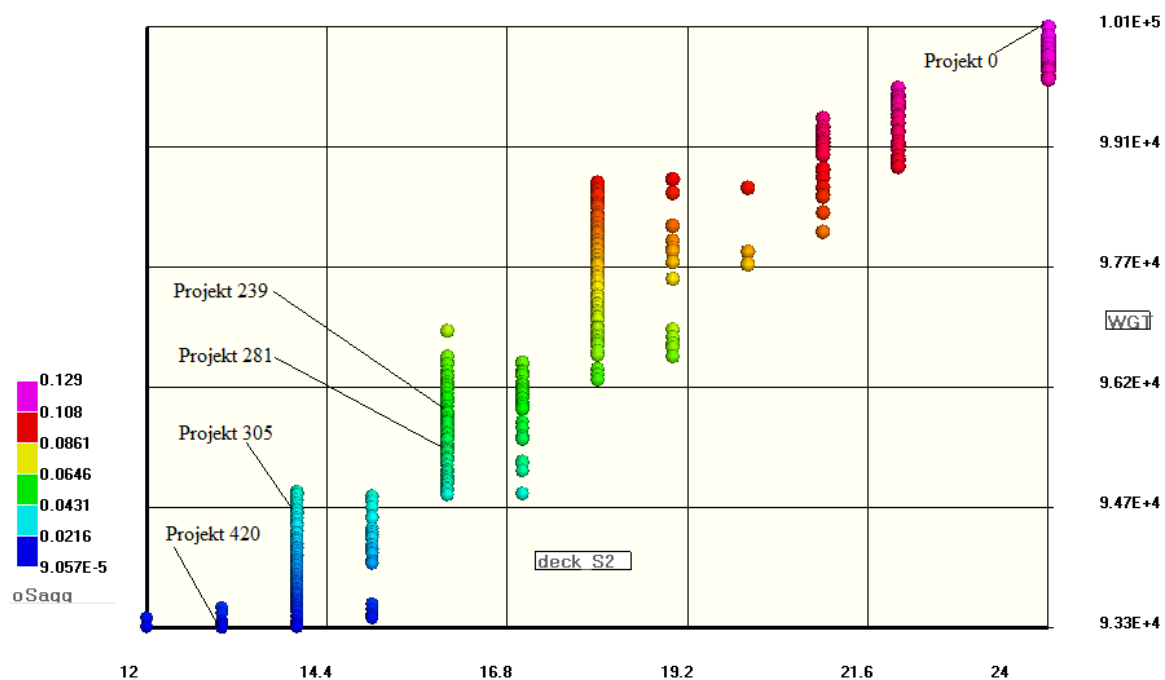
Slika 32. Prikaz Pareto fronte preko varijable deck_P3 i ciljeva



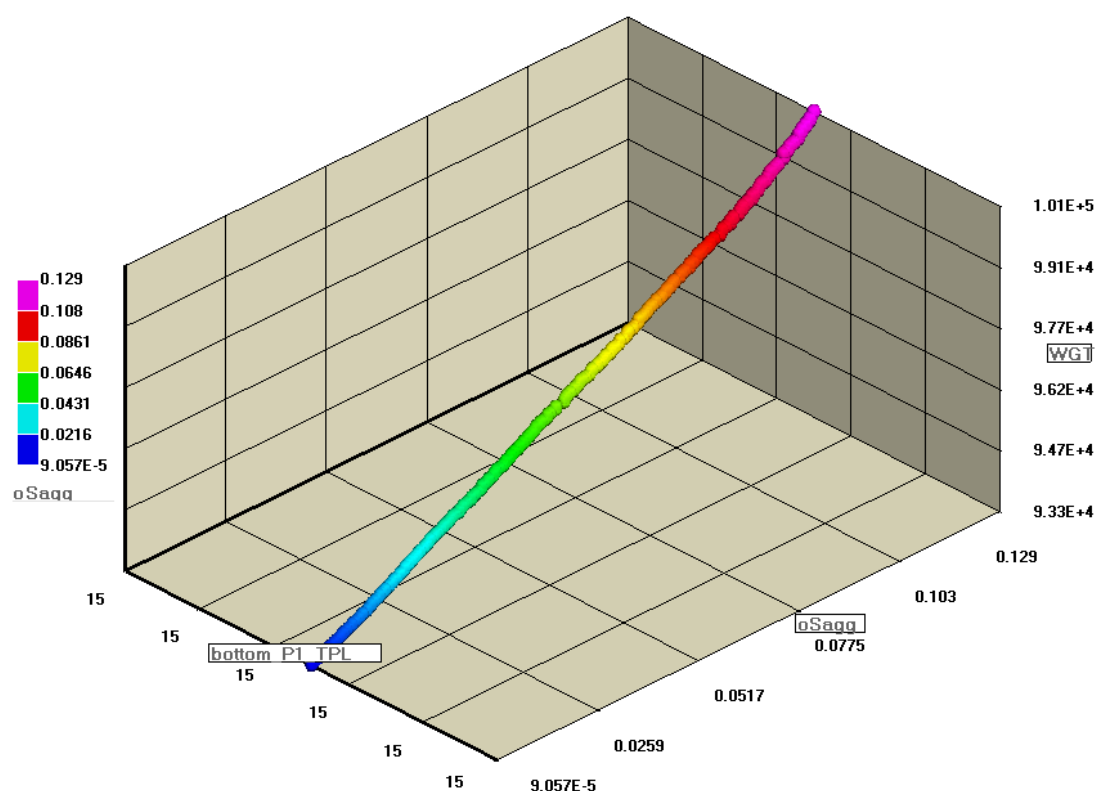
Slika 33. Prikaz promatranih projekata Pareto fronte preko varijable deck_P3 i ciljeva



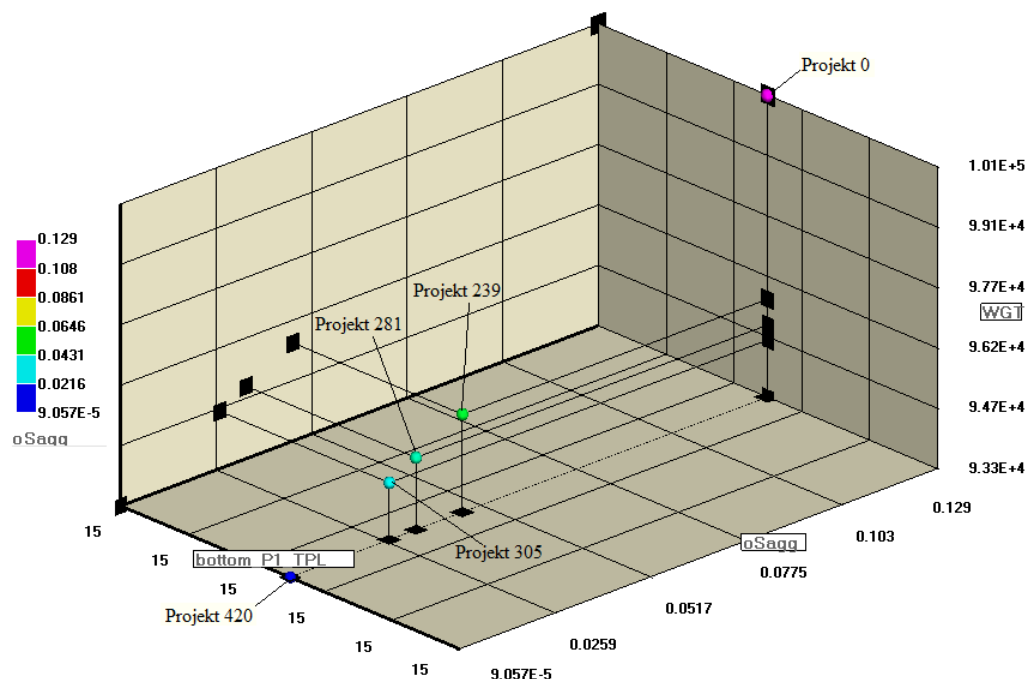
Slika 34. 2D prikaz Pareto fronte u ovisnosti o varijabli deck_P3 i cilju maksimizacije podobnosti momenta savijanja za progib



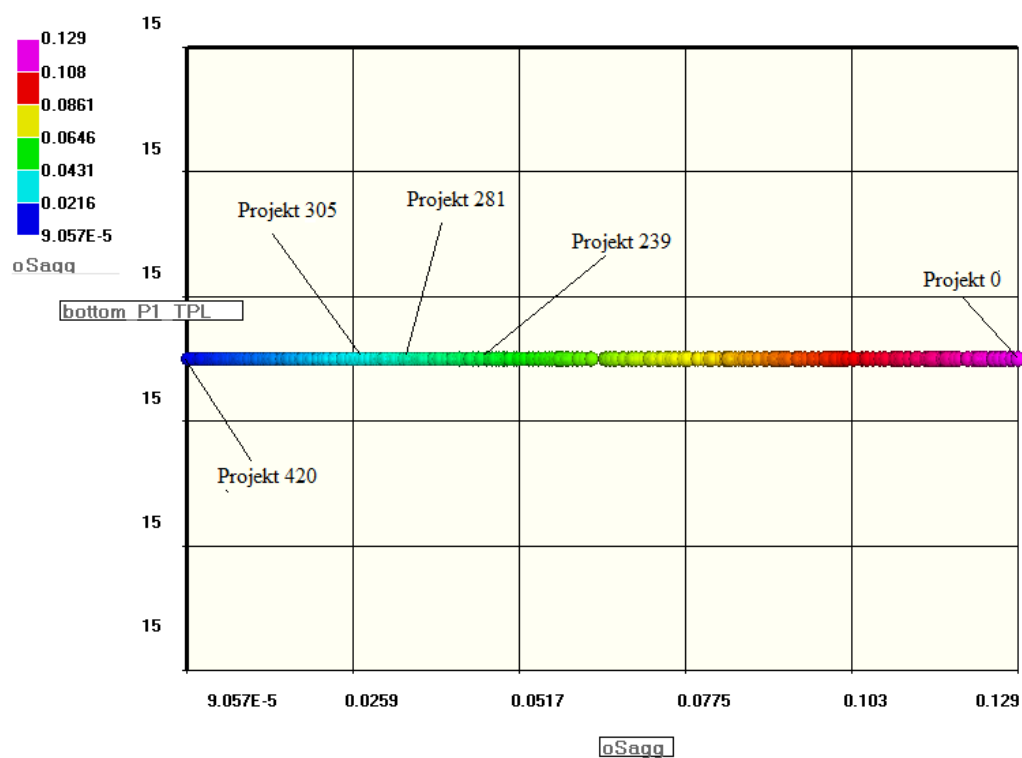
Slika 35. 2D prikaz Pareto fronte u ovisnosti o varijabli *deck_P3* i cilju minimizacije mase



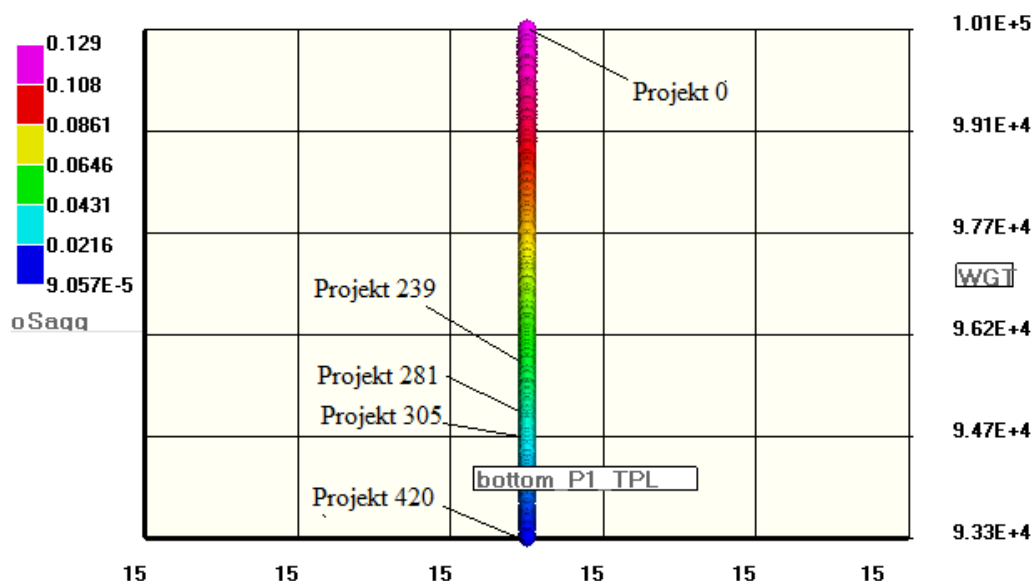
Slika 36. Prikaz Pareto fronte preko varijable *bottom_P1* i ciljeva



Slika 37. Prikaz promatranih projekata Pareto fronte preko varijable *bottom_P1* i ciljeva

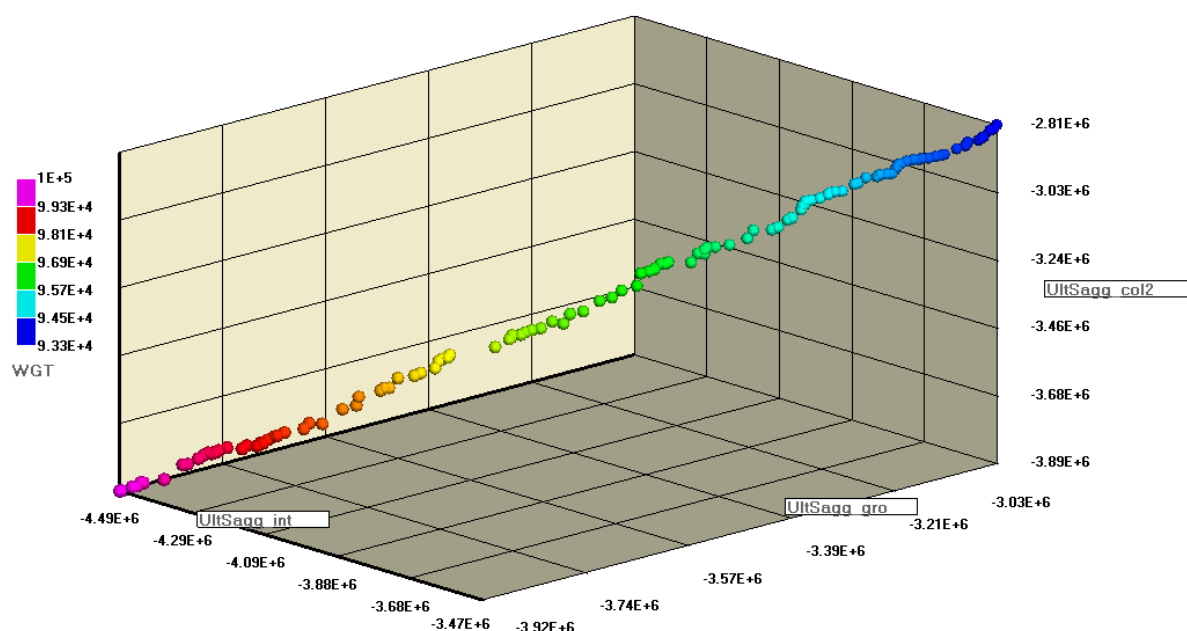


Slika 38. 2D prikaz Pareto fronte u ovisnosti o varijabli *bottom_P1* i cilju maksimizacije podobnosti momenta savijanja za progib

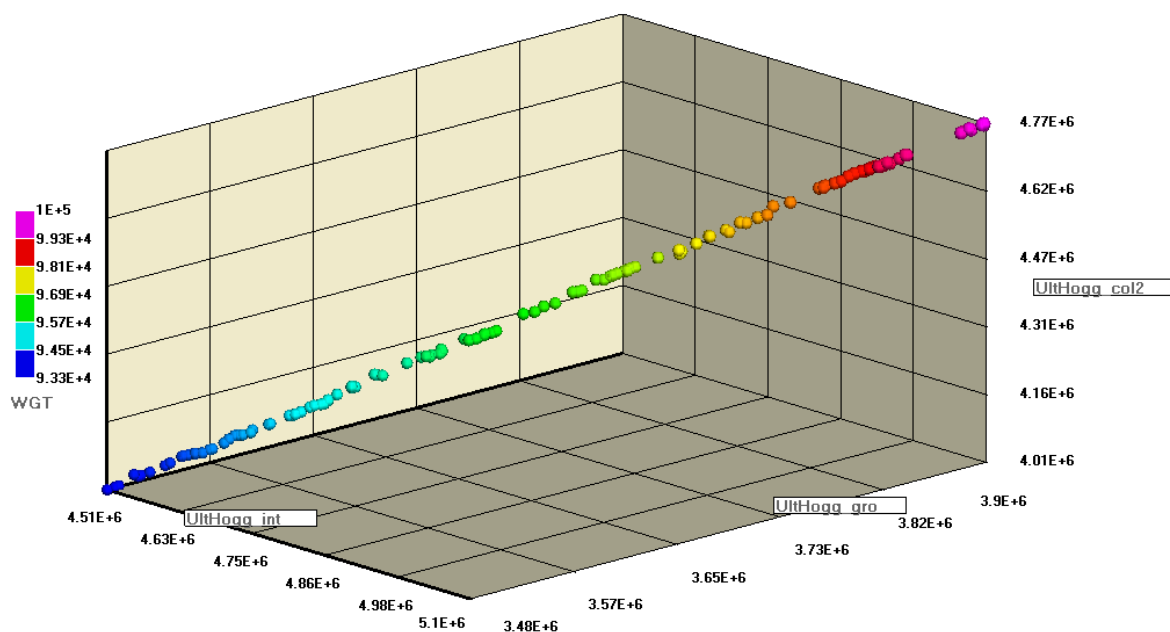


Slika 39. 2D prikaz Pareto fronte u ovisnosti o varijabli *bottom_P1* i cilju minimizacije mase

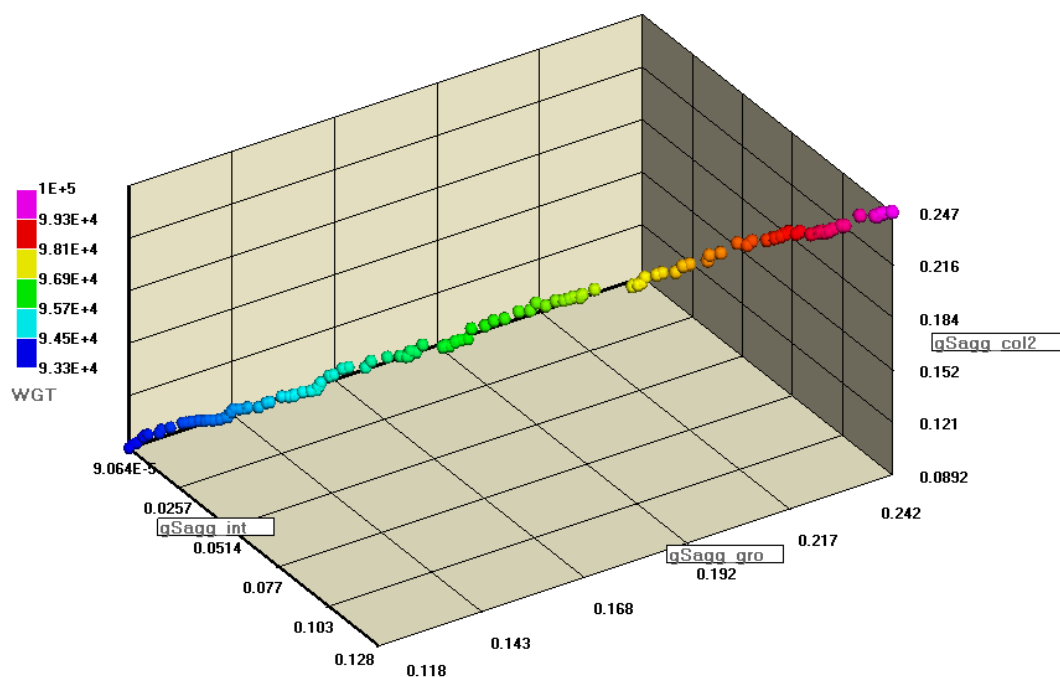
Na idućim slikama prikazane su Pareto fronte za oštećene modele. Ovo je prikazano kako bi se potvrdilo da pretpostavka objašnjena na početku točke 5.4. Optimizacija glavnog rebra tankera, vezana uz odabrani cilj faktor podobnosti (maksimizacija za slučaj progiba kod neoštećenog modela), je opravdana.



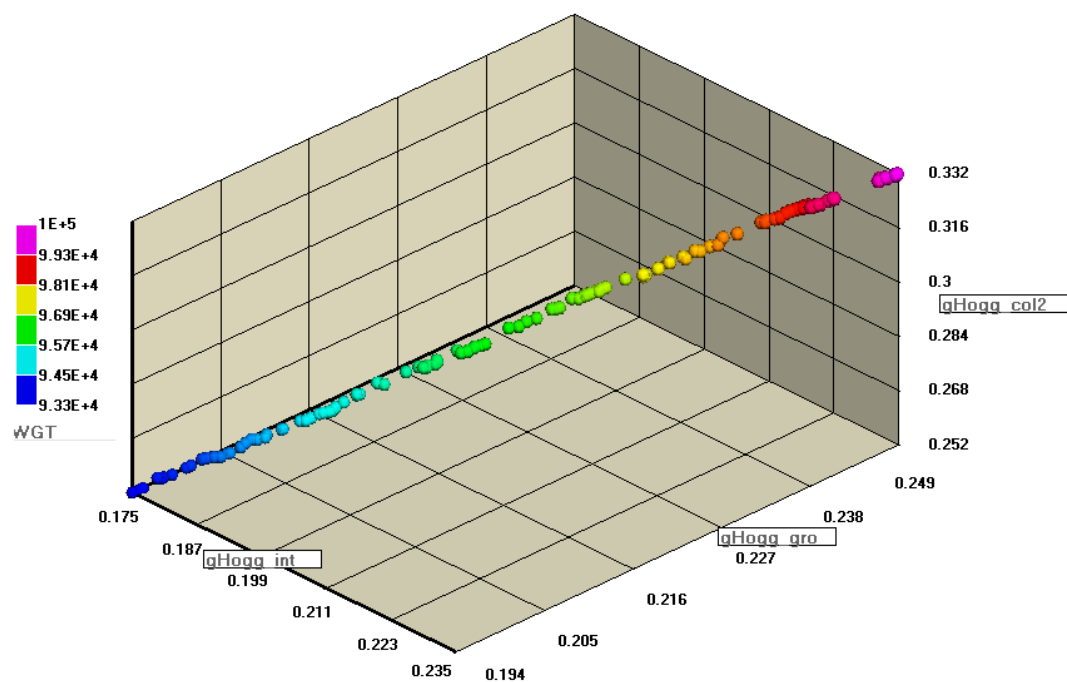
Slika 40. Pareto fronta prikazana preko graničnih momenta savijanja za slučaj progiba za neoštećenu konstrukciju, te za oštećenje uslijed sudara i ulijed nasukavanja



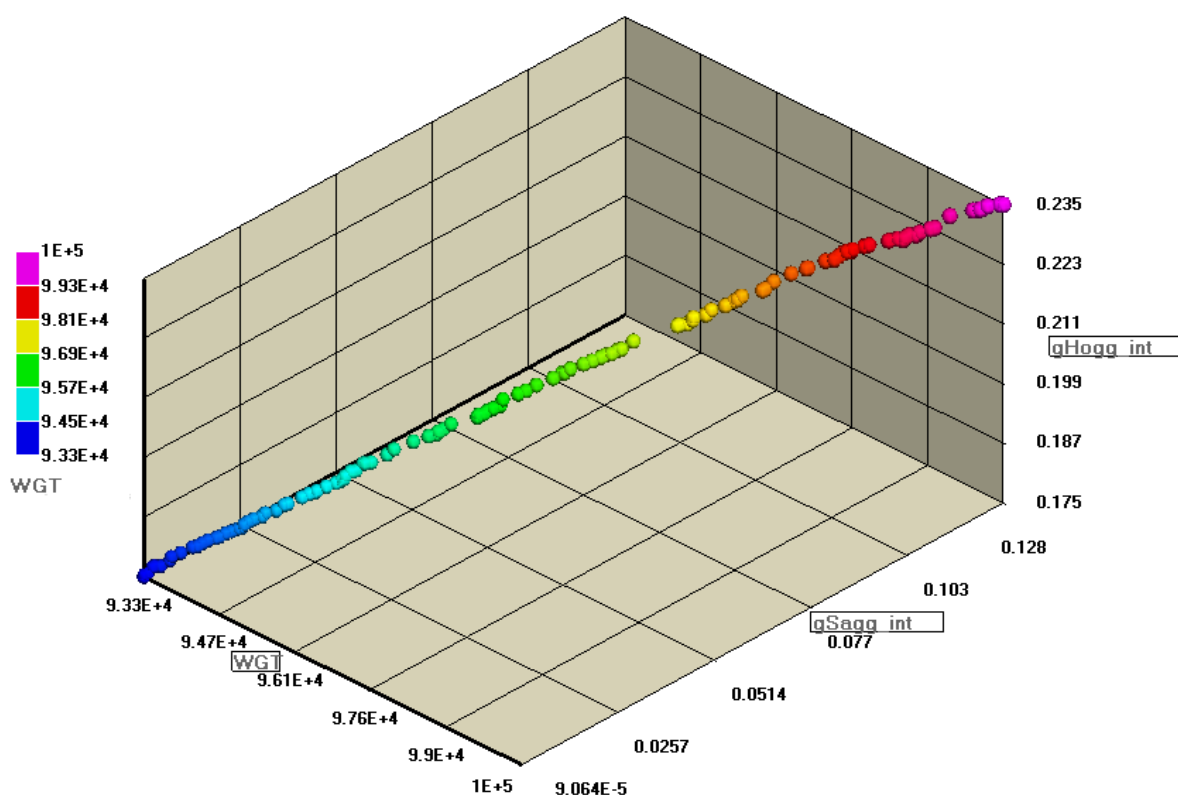
Slika 41. Pareto fronta prikazana preko graničnih momenta savijanja za slučaj progiba za neoštećenu konstrukciju, te za oštećenje uslijed sudara i ulijed nasukavanja



Slika 42. Pareto fronta prikazana preko parametara podobnosti momenta savijanja za slučaj progiba za neoštećenu konstrukciju, te za oštećenje uslijed sudara i ulijed nasukavanja



Slika 43. Pareto fronta prikazana preko parametara podobnosti momenta savijanja za slučaj pregiba za neoštećenu konstrukciju, te za oštećenje uslijed sudara i ulijed nasukavanja



Slika 44. Pareto fronta prikazana preko parametara podobnosti momenta savijanja za slučaj pregiba i za slučaj progiba neoštećenog modela, te cilja minimizacije mase

Budući da je se do predhodno prikazanih fronti došlo pomoću faktora podobnosti za slučaj progiba može se zaključiti kako su prikazi za varijable palube i dna očekivani. Poznato je da je slučaj progiba opasniji za brod od slučaja pregiba. U progibu je paluba tlačno opterećena, te do popuštanja dođe prije nego dođe do popuštanja dna. Iz slika se vidi da je dno držano stalno na minimalnoj vrijednosti varijable, pa se može zaključiti da je i sa tom vrijednošću uvijek bio zadovoljen zahtjevani moment savijanja, te da dno u slučaju progiba nije izloženo opasnosti kolapsa nekog od njegovih segmenata. Za palubu je drugačija situacija od dna. Dodatni komentar uz kolaps palube za slučaj progiba biti će dan u poglavlju 5.5. gdje su prikazane kolapsne sekvence za prototip i za odabrani Projekt 305.

U tablici 12. prikazane su vrijednosti graničnih momenata savijanja trupa broda za projekte istaknute na slici 29. Rezultati su prikazani za neoštećeno stanje, te za dva stanja oštećenja, oštećenje boka i oštećenje dna. Prvi je projekt sa najmanjom masom (Projekt 420), drugi i treći (Projekti 239 i 281) zadovoljavaju zahtjev za granični moment savijanja i imaju nešto veći parametar podobnosti u odnosu na projekt 305, četvrti je projekt koji sa najmanjom ostvarenom masom ima zadovoljen zahtjev za granični moment savijanja (Projekt 305), a peti projekt ima postignut najveći granični moment savijanja po apsolutnoj vrijednosti za slučaj progiba (Projekt 0). Na početku tablice prikazane su i vrijednosti za prototip.

U tablici 12. prikazani su faktori podobnosti za granični moment savijanja. Pri analizi rezultata optimizacije zanemaren je korekcijski faktor sigurnosti u zadavanju graničnih momenata savijanja izračunatih pomoću modula LUSA i programa MARS. Sam modul LUSA ne uzima u obzir faktor sigurnosti γ_R pri proračunu graničnih momenata savijanja, dok program MARS izračunava i moment sa i moment bez korekcijskog faktora za sigurnost. Harmonizirana pravila nalažu da se pri usporedbi graničnih momenata sa zahtjevanima izvrši korekcija graničnog momenta savijanja pomoću faktora sigurnosti definiranog u točki 2. Zahtjevi za proračun uzdužne granične čvrstoće trupa broda prema pravilima IACS H-CSR. Iz tog razloga izvršena je naknadna korekcija rezultata pomoću korekcijskog faktora za sigurnost γ_R koji za granične momente savijanja kod pregiba iznosi 1.21., a kod progiba 1.1. Za slučajeve sa oštećenjem dodatno je definiran C_{NA} , koeficijent neutralne osi, koji u slučaju sudara iznosi 1.1 za pregib, te 1.0 za progib, a u slučaju nasukavanja iznosi 1.0 i za pregib i za progib. Sa tim koeficijentom potrebno je pomnožiti korekcijski faktor sigurnosti kod oštećenih stanja.

Tablica 12. Usporedba momenata savijanja za odabrane projekte nakon optimizacije

Prototip		V _R	M _U [kNm]				(M _{UM} -M _{UL})/M _{UM}		Faktor podobnosti			
mase 104262 tona			MARS-M _{UM}	M _{UM} /γ _R	LUSA-M _{UL}	M _{UL} /γ _R	M _{UM}	M _D	MARS	LUSA	MARS(γ _R)	LUSA(γ _R)
neoštećeni	pregib	1.21	5333201	4407604	5113100	4225702	4.13%	3163477	0.2554	0.2356	0.1643	0.1438
	progib	1.1	-4378642	-3980584	-4179120	-3799200	4.56%	-3472115	0.1155	0.0924	0.0682	0.0450
oštećenje boka	pregib	1.33	4951521	3720151	4651050	3494403	6.07%	2392983	0.3484	0.3206	0.2171	0.1871
	progib	1.1	-3755837	-3414397	-3504210	-3185645	6.70%	-2349275	0.2304	0.1973	0.1848	0.1511
oštećenje dna	pregib	1.21	4368136	3610030	3977200	3286942	8.95%	2392983	0.2921	0.2487	0.2027	0.1574
	progib	1.1	-3903924	-3549022	-3672500	-3338636	5.93%	-2349275	0.2486	0.2197	0.2034	0.1739
Projekt 0		V _R	M _U [kNm]				(M _{UM} -M _{UL})/M _{UM}		Faktor podobnosti			
mase 100584 tona			MARS-M _{UM}	M _{UM} /γ _R	LUSA-M _{UL}	M _{UL} /γ _R	M _{UM}	M _D	MARS	LUSA	MARS(γ _R)	LUSA(γ _R)
neoštećeni	pregib	1.21	5350686	4422055	5100684	4215441	4.67%	3163477	0.2569	0.2344	0.1659	0.1426
	progib	1.1	-4737294	-4306631	-4502122	-4092838	4.96%	-3472115	0.1541	0.1292	0.1073	0.0821
oštećenje boka	pregib	1.33	5079369	3816205	4770340	3584027	6.08%	2392983	0.3595	0.3319	0.2292	0.1993
	progib	1.1	-4119365	-3744877	-3889520	-3535927	5.58%	-2349275	0.2736	0.2469	0.2290	0.2016
oštećenje dna	pregib	1.21	4297757	3551865	3897380	3220975	9.32%	2392983	0.2847	0.2392	0.1949	0.1475
	progib	1.1	-4212070	-3829155	-3920900	-3564455	6.91%	-2349275	0.2839	0.2507	0.2395	0.2055
Projekt 239		V _R	M _U [kNm]				(M _{UM} -M _{UL})/M _{UM}		Faktor podobnosti			
mase 95635 tona			MARS-M _{UM}	M _{UM} /γ _R	LUSA-M _{UL}	M _{UL} /γ _R	M _{UM}	M _D	MARS	LUSA	MARS(γ _R)	LUSA(γ _R)
neoštećeni	pregib	1.21	4927392	4072225	4824790	3987430	2.08%	3163477	0.2180	0.2080	0.1256	0.1152
	progib	1.1	-3991129	-3628299	-3811790	-3465264	4.49%	-3472115	0.0695	0.0466	0.0220	-0.0010
oštećenje boka	pregib	1.33	4559411	3425553	4290520	3223531	5.90%	2392983	0.3116	0.2839	0.1775	0.1479
	progib	1.1	-3416607	-3106006	-3184450	-2894955	6.79%	-2349275	0.1851	0.1509	0.1387	0.1041
oštećenje dna	pregib	1.21	4005724	3310516	3647420	3014397	8.94%	2392983	0.2520	0.2077	0.1609	0.1149
	progib	1.1	-3588404	-3262185	-3341430	-3037664	6.88%	-2349275	0.2087	0.1743	0.1627	0.1278
Projekt 281		V _R	M _U [kNm]				(M _{UM} -M _{UL})/M _{UM}		Faktor podobnosti			
mase 95008 tona			MARS-M _{UM}	M _{UM} /γ _R	LUSA-M _{UL}	M _{UL} /γ _R	M _{UM}	M _D	MARS	LUSA	MARS(γ _R)	LUSA(γ _R)
neoštećeni	pregib	1.21	4876736	4030360	4676800	3865124	4.10%	3163477	0.2131	0.1930	0.1205	0.0998
	progib	1.1	-3898562	-3544147	-3717040	-3379127	4.66%	-3472115	0.0579	0.0341	0.0103	-0.0136
oštećenje boka	pregib	1.33	4501027	3381688	4238400	3184373	5.83%	2392983	0.3058	0.2783	0.1712	0.1419
	progib	1.1	-3337081	-3033710	-3108080	-2825527	6.86%	-2349275	0.1737	0.1390	0.1271	0.0920
oštećenje dna	pregib	1.21	3969504	3280582	3617380	2989570	8.87%	2392983	0.2478	0.2037	0.1564	0.1108
	progib	1.1	-3505304	-3186640	-3260950	-2964500	6.97%	-2349275	0.1975	0.1625	0.1513	0.1158
Projekt 305		V _R	M _U [kNm]				(M _{UM} -M _{UL})/M _{UM}		Faktor podobnosti			
mase 94642 tona			MARS-M _{UM}	M _{UM} /γ _R	LUSA-M _{UL}	M _{UL} /γ _R	M _{UM}	M _D	MARS	LUSA	MARS(γ _R)	LUSA(γ _R)
neoštećeni	pregib	1.21	4819130	3982752	4632543	3828548	3.87%	3163477	0.2074	0.1884	0.1146	0.0951
	progib	1.1	-3823556	-3475960	-3663989	-3330899	4.17%	-3472115	0.0482	0.0269	0.0006	-0.0208
oštećenje boka	pregib	1.33	4429576	3328006	4164570	3128903	5.98%	2392983	0.2985	0.2702	0.1634	0.1333
	progib	1.1	-3252268	-2956607	-3008460	-2734964	7.50%	-2349275	0.1612	0.1230	0.1145	0.0759
oštećenje dna	pregib	1.21	3921325	3240764	3573760	2953521	8.86%	2392983	0.2420	0.1979	0.1505	0.1048
	progib	1.1	-3435953	-3123594	-3206720	-2915200	6.67%	-2349275	0.1878	0.1543	0.1415	0.1075
Projekt 420		V _R	M _U [kNm]				(M _{UM} -M _{UL})/M _{UM}		Faktor podobnosti			
mase 93253 tona			MARS-M _{UM}	M _{UM} /γ _R	LUSA-M _{UL}	M _{UL} /γ _R	M _{UM}	M _D	MARS	LUSA	MARS(γ _R)	LUSA(γ _R)
neoštećeni	pregib	1.21	4686691	3873298	4506971	3724769	3.83%	3163477	0.1940	0.1752	0.1009	0.0815
	progib	1.1	-3629922	-3299929	-3472744	-3157040	4.33%	-3472115	0.0222	0.0001	-0.0254	-0.0475
oštećenje boka	pregib	1.33	4271489	3209233	4009290	3012239	6.14%	2392983	0.2819	0.2525	0.1457	0.1146
	progib	1.1	-3069252	-2790229	-2809270	-2553882	8.47%	-2349275	0.1329	0.0892	0.0858	0.0417
oštećenje dna	pregib	1.21	3818335	3155649	3482250	2877893	8.80%	2392983	0.2295	0.1854	0.1375	0.0920
	progib	1.1	-3257160	-2961055	-3033010	-2757282	6.88%	-2349275	0.1619	0.1270	0.1152	0.0799

Granični momenti savijanja proračunati pomoću programa MARS i pomoću modula LUSA izračunati su bez korekcijskog faktora za sigurnost. Nakon izvršene korekcije rezultata izračunati su parametri podobnosti.

U tablici 12. iz parametara podobnosti, koji uključuju faktor sigurnosti, usporedbom proračuna u modulu LUSA i pomoću programa MARS vidljivo je da će neki projekti zadovoljiti faktor podobnosti za slučaj progiba neoštećenog modela izračunatog u programu MARS, a da za isti slučaj taj faktor neće biti zadovoljen proračunom u modulu LUSA.

Bitno je napomenuti da nije poznato da li su točnija rješenja izračunata programom MARS ili modulom LUSA, iz tog razloga, promatranjem dobivenih rješenja, može se zaključiti da bi daljnjim traženjem rješenja koja bi zadovoljila zahtjev za graničnu čvrstoću trebalo težiti zadovoljavanju prema rezultatima proračunatih pomoću modula LUSA. Za pronađena

rješenja koja bi zadovoljavala zahtjev za granični moment savijanja trebalo bi težiti da zadovolje parametar podobnosti za momente savijanja trupa prema modulu LUSA u slučaju progiba neoštećenog modela. Za takav ostvareni slučaj možemo pretpostaviti da će parametar podobnosti biti podoban i za ostale momenti savijanja kod oštećenja dna ili boka.

Projek 0 je projekt koji je dobiven prvom iteracijom. On ima maksimalnu masu, u iznosu od 100 584 tone, među nedominiranim rješenjima, te ima najviše zadovoljen parametar pogodnosti, vrijednosti 0.1659, promatran za kritično opterećenje progiba neoštećenog modela. Ovaj projek zadovoljio je provjeru uzdužne granične čvrstoće u oba programa. Parametari podobnosti izračunati u programu MARS i u modulu LUSA za projek 0 u odnosu na prototip imaju više zadovoljen parametar podobnosti, uz manju masu. Mase prototipnog modela je 104 262 tone.

Projekt 420 je projek dobiven u 421. iteraciji. To je projekt sa minimalnom masom na Pareto fronti. Za ovaj projek parametar podobnosti nije zadovoljen za slučaj progiba neoštećenog modela ni prema jednom ni prema drugom proračunu.

Usporedba rezultata iz programa MARS i iz modula LUSA korisna je iz razloga što rješenja koja nam nudi DeMak nemaju nikakvu informaciju o lokalnim kriterijima strukturnih elemenata, pa ukoliko se ostvari veza između rezultata vezanih za globalnu čvrstoću dobivenu pomoću modula LUSA i programa MARS može se za projektna rješenja optimizacije ispitati lokalni kriteriji strukturnih elemenata u programu MARS.

5.4.6.1. Odabrani projekt

Između nedominiranih projekata do kojih se došlo optimizacijom, promatrat će se projekt koji je uz najmanju masu postigao dovoljni granični moment savijanja koji zadovoljava zahtjev prema MARS-u za zahtjevani moment savijanja. Projekt koji će se promatrati ostvaren je u 305. iteraciji optimizacije.

5.5. Usporedba rezultata odabranog projekta i prototipa

Slijedi usporedba masa, te usporedba graničnih momenta savijanja za neoštećene modele.

Masa prototipnog modela je 104 262 tone, a masa modela odabranog projekta je 94 642 tone. Ostvareno smanjenje mase iznosi 9.23%.

Granični moment savijanja za slučaj progiba za prototipni model iznosi -4179120 kNm, a za model odabranog projekta iznosi -3663989 kNm, što znači da je po apsolutnoj vrijednosti ostvaren moment manji za 12.33%.

Granični moment savijanja za slučaj pregiba za prototipni model iznosi 5113100 kNm, a za model odabranog projekta iznosi 4632543 kNm, što znači da je po apsolutnoj vrijednosti ostvaren moment manji za 9.40%.

Budući da je zahtjevani moment savijanja prema pravilima jednak za prototipni i odabrani model, te iznosi za progib -3472115 kNm, a za pregib 3163477 kNm, može se primjetiti da je kod oba modela zadovoljen zahtjev za granični moment savijanja. Prototipni model ima veću rezervu čvrstoće od odabranog modela i to u slučaju progiba za 72,86%, a u slučaju pregiba za 24,65%.

Radi preglednosti predhodno navedeni podaci prikazani su u tablici 13.

Tablica 13. Usporedba vrijednosti proračunatih za prototip i projekt 305

	masa [tone]	M_U		M_D		$M_U - M_D$	
		Progib	Pregib	Progib	Pregib	Progib	Pregib
Prototip	104262	-4179120	5113100	-3472115	3163477	707005	1949623
Projekt 305	94642	-3663989	4632543	-3472115	3163477	191874	1469066
	9.23%	12.33%	9.40%			72.86%	24.65%

U tablicama 14. i 15. prikazane su debljine oploćenja i odabrani profili. Uspoređujući prototip sa odabranim modelom može se primjetiti kako se optimizacijom projektnog problema našao projekt kojemu su skoro svi elementi svedeni na minimalne dimenzije koje propisuju Pravila.

Tablica 14. Usporedba debljina oploćenja prototipa i odabranog projekta

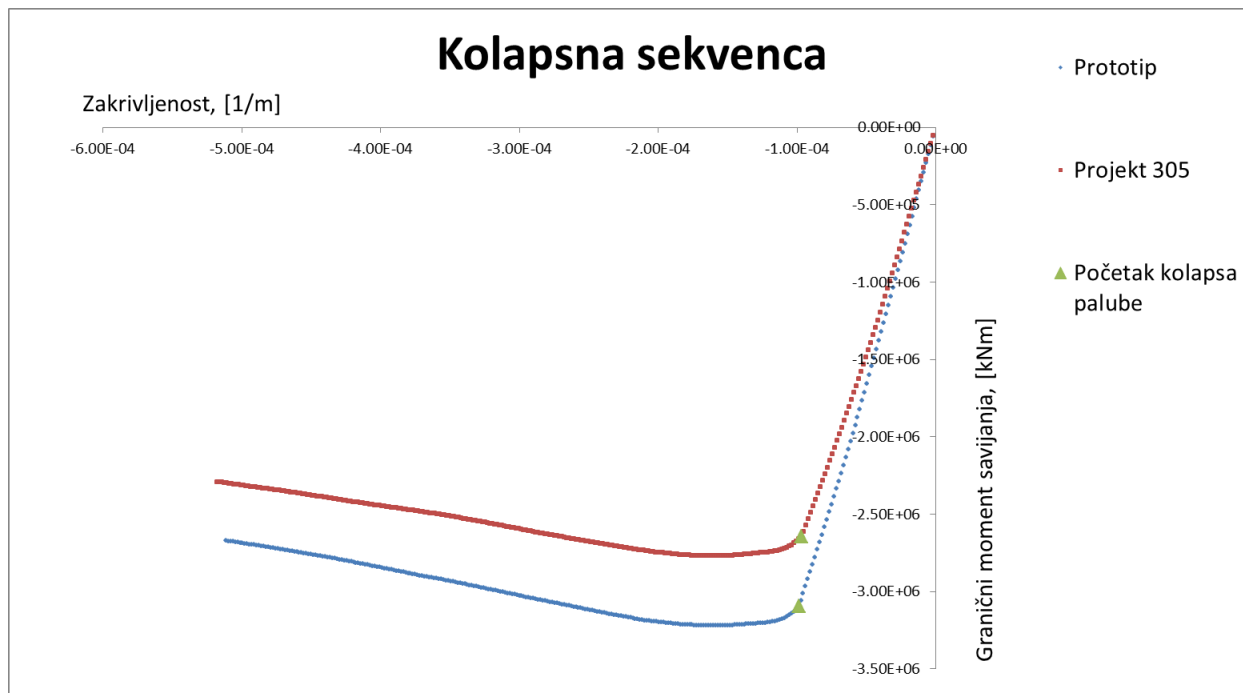
Broj	Područje	Prototip					Odabrani projekt				
		Gross debljina [mm]		Net debljina [mm]		Korozijski dodatak [mm]	Gross debljina [mm]		Net debljina [mm]		Korozijski dodatak [mm]
		Model	Pravila	Model	Pravila		Model	Pravila	Model	Pravila	
1	keel	17.5	15.5	15	13	2.5	15.5	15.5	13	13	2.5
2	bottom shell	17.5	16.5	15	13.5	3	16.5	16.5	13.5	13.5	3
3	bilge	16.5	14.5	13.5	11.5	3	14.5	14.5	11.5	11.5	3
4	side shell	15.5	15.5	12.5	12.5	3	15.5	15.5	12.5	12.5	3
5	side shell	17.5	15	14.5	12	3	15	14	12	11	3
6	side shell	17.5	15.5	14	12	3.5	15.5	14.5	12	11	3.5
7	side shell	17.5	15	13.5	11	4	17.5	15	13.5	11	4
8	side shell	15.5	15	12	11.5	3.5	19	15	15.5	11.5	3.5
9	side shell	15.5	15.5	12	12	3.5	17.5	14.5	14	11	3.5
10	deck	16	13.5	12	9.5	4	13.5	12.5	9.5	8.5	4
11	deck	17.5	13	13.5	9	4	16	12	12	8	4
12	inner bottom	18	13.5	15.5	11	2.5	13.5	13.5	11	11	2.5
13	inner bottom	18	18	14	14	4	18	17.5	14	13.5	4
14	hopper side	19	19	16	16	3	19	18	16	15	3
15	hopper side	19.5	18.5	16.5	15.5	3	18.5	17.5	15.5	14.5	3
16	inner hull	18	17	15	14	3	17	16	14	13	3
17	inner hull	18.5	16.5	15.5	13.5	3	16.5	15.5	13.5	12.5	3
18	inner hull	17.5	15.5	14.5	12.5	3	15.5	14.5	12.5	11.5	3
19	inner hull	16	14.5	13	11.5	3	14.5	13.5	11.5	10.5	3
20	inner hull	15.5	14	12.5	11	3	14	13	11	10	3
21	inner hull	15.5	13	11.5	9	4	13	13	9	9	4
22	inner hull	16	13	12	9	4	13	12	9	8	4
23	double bottom girder I	20	15.5	17	12.5	3	15.5	15.5	12.5	12.5	3
24	double bottom girder II	12.5	12	9.5	9	3	12	12	9	9	3
25	double bottom girder III	14.5	12	11.5	9	3	12	12	9	9	3
26	stringer I	11	11	8	8	3	11	11	8	8	3
27	stringer II	11	11	8	8	3	11	11	8	8	3
28	stringer III	12	13	8	9	4	13	12	9	8	4
29	upper bulkhead stool	12	12.5	8.5	9	3.5	12.5	11.5	9	8	3.5
30	lower bulkhead stool	16	10.5	13.5	8	2.5	10.5	10.5	8	8	2.5
31	lower bulkhead stool	17.5	12	15	9.5	2.5	12	12	9.5	9.5	2.5

Tablica 15. Usporedba profila prototipa i odabranog projekta

		Profil	
Broj	Područje	Prototip	Odabrani projekt
1	keel	F 280x16	F 280x16
2	bottom shell	HP 370x15	HP 370x15
3	bottom shell	HP 400x14	HP 370x15
4	bottom shell	HP 400x16	HP 370x15
5	outer side shell	HP 370x13	HP370x13
6	outer side shell	HP 280x11	HP220x11.5
			HP220x10
			HP240x10
			HP280x12
			HP280x12
7	deck (wing)	HP 260x11	HP240x10
8	deck	HP 300x13	HP260x11
9	inner bottom	HP 370x15	HP370x13
10	inner hopper	HP 370x13	HP370x13
11	inner side shell	HP 340x14	HP340x12
12	inner side shell	HP 300x11	HP340x12
13	inner side shell	HP 300x11	HP320x12
14	inner side shell	HP 300x11	HP300x11
			HP300x13
			HP260x11
15	inner wing	HP 280x11	HP240x11
16	inner wing	HP 300x13	HP320x13
17	deck (stool)	F 220x14	F 220x14
18	upper stool	HP280x11	HP240x11
19	upper stool	HP 220x10	HP240x11
20	lower stool	HP 220x10	HP200x9
21	lower stool	HP240x11	HP200x11.5
22	inner bottom (stool)	F 180x13	F 180x13
23	girder 1	F 250x18	F 250x18
24	girder 2	F 180x13	F 180x13
25	girder 3	F 180x13	F 180x13
26	stringer 1	F 180x12	F 180x12
27	stringer 2	F 180x12	F 180x12
28	stringer 3	F 180x12	F 180x12

Kolapsna sekvenca daje nam jasan uvid u ponašanje kako cijelog presjeka, tako i svakog elementa tog presjeka. Moment savijanja prikazan je kao funkcija zakrivljenosti u dijagramu iz kojeg se može promatrati kojim redoslijedom su koji elementi promatranog segmenta kolabirali. Navedeno je i o kakvoj se vrsti kolapsa radilo.

Na slici 45. prikazane su kolapsne sekvence za prototip i za odabrani projekt, za stanje progiba, te je na njima označeno kada je paluba započela sa kolapsom.



Slika 45. Kolapsna sekvenca prototipa i odabranog projekta sa Pareto fronte

Kod prototipa paluba je prva izgubila nosivost, pri momentu koji je manji od maksimalnog graničnog momenta. Došlo je do torzijskog izvijanja.

Kod odabranog projekta paluba je prva izgubila nosivost, pri momentu koji je manji od maksimalnog graničnog momenta. Kod ovog modela došlo je do globalnog gredno-štapnog izvijanja.

Može se primjetiti kako obje sekvence prate isti trend, uz nešto niže vrijdnosti za projekt 305, što je bilo za očekivat budući da se radi o modelu sa manjom masom.

6. Zaključak

U radu je provedeno projektiranje uzdužnih dimenzija glavnog rebra tankera za prijevoz nafte prema novim Harmoniziranim zajedničkim pravilima za projektiranje konstrukcije brodova za prijevoz rasutog tereta i tankera za prijevoz nafte Međunarodnog udruženja klasifikacijskih društava.

Na osnovi postojećeg početnog modela, projektiranog prema starim CSR pravilima za tankere, dimenzionirana je prototipna konstrukcija, prema Harmoniziranim zajedničkim pravilima za brodove za rasuti teret i tankere, primjenom programa MARS 2000.

Potom je provedena višeciljna optimizacija konstrukcije sa ciljem minimizacije mase, te maksizacije graničnog momenta savijanja za slučaj progiba pomoću programa DeMak i modula LUSA. Kritično ograničenje bio je parametar podobnosti graničnog momenta savijanja za neoštećeni model u slučaju progiba.

Pareto fronta dobivena optimizacijom ima 420 nedominiranih rješenja. Nedominirana rješenja su u području masa od 93 253 tone do 100 584 tone, u području momenata savijanja za slučaj progiba od -3 629 922 kNm do -4 737 294 kNm, te parametra podobnosti za momentate savijanja za slučaj progiba od 0.0001 do 0.1292.

Na Pareto fronti izdvojeno je nekoliko projekata za koje je izvršena provjera graničnih momenta savijanja u programu MARS, te su ti rezultati uspoređivani s rezultatima koje je ponudila optimizacija za te projekte. Kod svih promatranih modela uočeno je da je kritični parametar podobnosti bio parametru podobnosti neoštećenog modela za slučaj progiba. Time se može zaključiti da je sasvim opravdano definiranje kritičnog ograničenja vezanog uz granični moment savijanja za neoštećeni model u slučaju progiba kao optimizacijskog cilja.

Analizom rezultata izračunatih pomoću programa MARS, te pomoću modula LUSA, uočena su odstupanja među rezultatima za granične momente savijanja koja su unutar očekivanih u skladu sa rezultatima istraživanja u člaku [16].

Odabrani projekt sa Pareto fronte koji je detaljnije uspoređivan s prototipom je projekt koji je pronađen na Pareto fronti sa pripadnom minimiziranom masom u odnosu na prototip, uz zadovoljavanje uzdužne granične čvrstoće provjerene i pomoću modula LUSA i pomoću programa MARS. Usporedbom kolapsnih sekvenci prototipa i odabranog projekta primijećen

je isti trend ponašanja modela, odnosno kod oba modela ustanovljeno je da će kolaps konstrukcije započeti na palubi, i to prije postizanja uzdužnog graničnog momenta.

S obzirom da je optimizacija provedena bez korekcijskih faktora sigurnosti vezanih uz uzdužni granični moment savijnja, prijedlog za daljnji rad na ovu temu je provođenje iste uz uključivanje korekcijskih faktora sigurnosti.

Literatura:

- [1] IACS: Harmonized Common Structural Rules for Bulk Carriers and Doble Bottom Tankers (draft version), International Association of Classification Societies, London, UK, April 2013.
- [2] Kitarović, S., "Analiza uzdužne granične nosivosti u konceptualnoj sintezi tankostjenih konstrukcija", Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [3] Žiha, K., Parunov, J., Tušek, B.: "Granična čvrstoća brodskog trupa", Brodogradnja, 2007, Vol.58, No.1, p. 29-41.
- [4] "OCTOPUS Software Documentation", University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Zagreb, 2012.
- [5] Prebeg, P., "Višekriterijsko projektiranje složenih tankostjenih konstrukcija", Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [6] Rao, S. S., (1996), "Engineering Optimization - Theory and Practice" (3rd Edition). John Wiley & Sons
- [7] Žanić, V., Prebeg, P. and Kitarović, S., (2007), "Decision Support Problem Formulation for Structural Concept Design of Ship Structures", MARSTRUCT Conference, Glasgow, pp. 499-512.
- [8] Kennedy, J., & Eberhard, R.C., (1995), "Particle swarm optimization. In Proceedings of IEEE international conference on neural networks", Piscataway, NJ, USA (pp. 1942-1948).
- [9] Važić, B., Posavec, D., Bingula, S., Pijaca, N. i Popović, S., (2008): "Implementacija Multiobjective Particle Swarm Optimization optimizacijskog algoritma u OCTOPUS DESIGNER", Seminarski rad iz kolegija Osnivanje konstrukcije zrakoplova, FSB Zagreb, Hrvatska.
- [10] Venter, G. and Sobieski, J.(2002): Particle Swarm Optimization, AIAA 2002-1235, 43rd AIAA/ASME/ASCE/ AHS/ASC, Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Denver, CO.

- [11] Coello C.A.C. and Lechunga M.S. (2002). MOPSO: "A Proposal for Multiple Objective Particle Swarm Optimization". In Proceedings of the IEEE World Congress on Computational Intelligence, Hawaii, May 12-17, 2002. IEEE Press.
- [12] Knowles J.D. and Corne D. , (2000), Approximating the nondominated front using the pareto archived evolution strategy. *Evolutionary Computation*, 8(2) :149-172.
- [13] Mostaghim S. and Teich J., (2003), "Strategies for finding good local guides in multi objective particle swarm optimization". In IEEE Swarm Intelligence Symposium, pages 26–33.
- [14] C. A. Coello Coello, G. B. Lamont and D. A. Van Veldhuizen, (2007). "Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems". Kluwer Academic Publishers, New York, second edition.
- [15] Vazić, B. (2009), "Quality Measures of Pareto Fronts Obtained By Multiobjective Optimization Algorithms", Projekt, Sveučilište u Zagrebu, Hrvatska,.
- [16] M. Bicak: "Calculation of hull girder ultimate strength. B.sc Thesis, University of Zagreb", Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Zagreb, 2013.